ILYA PRIGOGINE - ISABELLE STENGERS

ENTRE EL TIEMPO Y LA ETERNIDAD



HUNAB KU

PROYECTO BAKTUN

Ilya Prigogine
e Isabelle Stengers

Entre el tiempo y la eternidad

Versión española de
Javier García Sanz

Alianza
Editorial

Título original:
Erare le temps el l'éternité

Primera edición en "Alianza Estudio": 1991 (Argentina)
Segunda edición en "Alianza Estudio": 1992 (Argentina)

ISBN: 950-40-0061-4
Hecho el depósito que marca la ley 11.723
Impreso en Argentina - Printed in Argentina

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Este libro tiene una curiosa historia. En un principio iba a servir como introducción a una recopilación de artículos de uno de nosotros. Se trataba de describir en pocas páginas en qué forma se han concretado y desarrollado las perspectivas que abrió *La nueva alianza.* Poco a poco tuvimos que rendirnos a la evidencia: la «introducción» se había convertido en la obra cuya necesidad habíamos subrayado en el prólogo a la edición de bolsillo de *La nueva alianza.* «En todos los niveles, escribíamos, la ciencia redescubre el tiempo. Y quizá esta problemática del tiempo nos permitirá vislumbrar un nuevo tipo de unidad del conocimiento científico.» Pero, nos lamentábamos, «debería escribirse otro libro para esbozar el cuadro de este renacimiento»[1].

Sin embargo, la historia se repite. En *La nueva alianza* advertíamos a nuestros lectores: «Hemos preferido presentar las cosas en su estado actual, aun sabiendo cuán incompletas son nuestras respuestas y cuán imprevisibles son los problemas que suscitarán las teorías actuales.» Esto es ahora más cierto que tíunca. En los últimos años, algunos problemas teóricos funda-

[1] I. Prigogine e I. Stengers, *La Nouvelle Alliance,* p. 8. Nos referimos aquí a U edición de 1986 completada con un prólogo y dos apéndices, París, Gallimard, folio Essais. Edición española: *La nueva alianza,* Alianza Editorial, Madrid, 1990².

mentales para nuestro enfoque han conocido importantes desarrollos. Hemos preferido describirlos «en directo», incluso antes de que algunos de estos desarrollos hayan podido ser objeto de publicaciones en revistas científicas especializadas. Son estos nuevos problemas, actualmente en plena evolución, los que hacen del presente libro no una «continuación» de *La nueva alianza* sino un replanteamiento más radical del problema que ya constituía su hilo conductor, el problema del tiempo.

En su mayor parte, *La nueva alianza* estaba dedicado a la renovación de la fenomenología del tiempo suscitada por el desarrollo de la termodinámica de sistemas lejos del equilibrio. Exponíamos allí la inversión del paradigma clásico que identificaba crecimiento de entropía con evolución hacia el desorden. Describíamos el papel constructivo de los fenómenos irreversibles y los fenómenos de autoorganización que tienen lugar lejos del equilibrio. Discutíamos el papel que pueden jugar las «estructuras disipativas» en la comprensión de la vida. Los diez años que nos separan de estos trabajos han visto un extraordinario desarrollo de la nueva ciencia del no-equilibrio.

La nueva alianza llevaba también el debate hasta el mismo corazón de la dinámica clásica. Mostrábamos cómo el «renacimiento» de la dinámica, ligado al descubrimiento de sistemas dinámicos inestables, ponía en cuestión el ideal determinista que había guiado a la mecánica desde su origen. Mostrábamos que estos sistemas inestables conducen a una nueva descripción que marca el paso desde el determinismo a las probabilidades, de la reversibilidad a la irreversibilidad. En esa época estas conclusiones podían parecer revolucionarias a algunos. Hoy son aceptadas, si no por la mayoría, al menos por un número cada vez mayor de físicos.

No obstante, es en los dominios de la mecánica cuántica y de la cosmología, a las que *La nueva alianza* sólo hacía breves alusiones, donde a partir de ahora se plantea de manera apremiante la cuestión del tiempo. La mecánica cuántica y la cosmología, fundada en la teoría de la relatividad general, son las «ciencias punteras» del siglo XX, las que han sustituido a la dinámica clásica en tanto que «ciencias fundamentales». Son estas disciplinas las que nos ponen hoy frente a cuestiones que son las propias de la física ya desde su origen: el espacio, el tiempo, la materia. Con respecto a ellas se plantea hoy la cuestión del tiempo, del mismo modo que se planteaba en el

siglo XIX con respecto a la dinámica clásica. Ahora bien, cualquiera que sea su carácter revolucionario, la mecánica cuántica y la relatividad general son, desde el punto de vista de la concepción del tiempo, las herederas directas de la dinámica clásica. Al igual que esta última, ellas encierran, como veremos, una negación radical del tiempo irreversible.

La formulación de una interpretación dinámica de la irreversibilidad no pone en cuestión la dinámica clásica sino el modelo de inteligencia que la ha acompañado hasta años recientes, el de la trayectoria determinista y reversible. En cambio, la cuestión de la significación del tiempo irreversible en mecánica cuántica y en cosmología nos llevará a proponer modificaciones de estas estructuras conceptuales.

Heisenberg definió en cierta ocasión ante uno de nosotros lo que para él constituía la diferencia entre un pintor abstracto y un físico teórico. El pintor, decía, tratará de ser lo más original que pueda, mientras que el físico intentará permanecer lo más fiel que pueda a su tradición teórica; sólo cuando no tenga otra salida empezará a modificarla. Actualmente nos encontramos en esta situación. Como veremos, son condicionamientos internos a la física y no la convicción, por profunda que sea, de que la irreversibilidad debe tener un significado fundamental en el interior de la física, los que nos permiten proponer una modificación de las perspectivas fundamentales de la física.

No obstante, semejante andadura es atrevida: se trata de poner en cuestión las dos ciencias cuya fecundidad ha transformado la imagen de la física contemporánea. Por otra parte, como ya hemos dicho, implica investigaciones todavía en curso y que, sin duda, conocerán desarrollos insospechados. Pero estamos convencidos de que, cualesquiera que sean esos desarrollos, ya no es posible una vuelta atrás. El reconocimiento del carácter ilegítimo del ideal de inteligibilidad que hasta el presente había guiado a la física moderna, incluidas la mecánica cuántica y la relatividad, nos parece un hecho consumado. Se ha pasado definitivamente una página de la historia de la física.

Desde el punto de vista de los cambios conceptuales fundamentales que ha conocido la física, el siglo XX sólo es comparable al siglo XVII que vio el nacimiento de la ciencia moderna. Nuestro siglo comenzó con un doble estallido, con la creación de los grandes esquemas conceptuales que hoy día prevalecen, la

relatividad y la mecánica cuántica. Curiosamente, hoy podemos comprender mejor en qué medida estos esquemas, a pesar de su carácter revolucionario, se enmarcan todavía en la tradición de la física clásica que los ha alimentado, ya que esta continuidad subyacente ha sido puesta en cuestión por los inesperados descubrimientos experimentales de las partículas elementales, estructuras de no-equilibrio, evolución del Universo. Estos tres tipos de descubrimientos apuntan en la misma dirección: hacia la necesidad de superar la negación del tiempo irreversible, negación que constituye la herencia legada por la física clásica a la relatividad y la mecánica cuántica. Hoy día se percibe una nueva coherencia: en todos Jos niveles de la física encontramos ese tiempo que la tradición clásica negaba.

El terreno que cubre este libro es, por lo tanto, mucho más extenso que el de *La nueva alianza*. Esta extensión refleja la singularidad de la física, caracterizada a la vez por la diversidad de sus aproximaciones teóricas y por la profunda solidaridad que las une. Esta singularidad de la física, y no ya su historia como era el caso de *La nueva alianza,* es lo que constituye el hilo conductor de nuestro libro.

Nuestro libro no es, sin embargo, una introducción a la física contemporánea. El lector no encontrará en los capítulos que siguen ninguna exposición general de la dinámica, la termodinámica, la mecánica cuántica o la relatividad. Tampoco encontrará un examen de algunos temas importantes de la física actual como son la simetría y la unificación de las interacciones fundamentales. Por otra parte, y sobre todo en el caso de la ciencia de los sistemas disipativos lejos del equilibrio, no daremos una panorámica completa sino que nos inspiraremos principalmente en problemas estudiados por nuestro grupo. Hubiera sido una empresa tan vana como desmesurada el intentar sustituir a las obras generales que introducen al público cultivado en los diferentes campos de la física. Hubiera sido además fuente de malentendidos: nuestro libro no es una presentación de la física sino el seguimiento de una misma cuestión a través de la multiplicidad de sus campos. De este modo, esta cuestión nos llevará a abordar algunos dominios, el de la mecánica cuántica y el de la cosmología, con una aproximación poco usual aunque, pensamos, accesible a los lectores que se interesan por el desarrollo de las ideas científicas de nuestro tiempo. Para

aquellos que quisieran profundizar en algunos aspectos esenciales de nuestra obra, hemos añadido tres apéndices que, aún sin entrar en los detalles de las deducciones, requieren algunos conocimientos técnicos.

El lector, mediante el poder provocador del interrogante que nos guía al igual que ha inspirado la vida científica de uno de nosotros, descubrirá, así lo esperamos, cuán ajenas son las teorías físicas a la imagen casi imperialista que con frecuencia se hace de ellas. Lo que revelarán estas teorías al ser confrontadas con la cuestión del tiempo es su carácter de invención, audaz y arriesgada, de creación de significación. Es este carácter el que nos permitirá comprender cómo han podido negar hasta ahora el tiempo que, pese a ello, afirman nuestras descripciones fenomenológicas de la Naturaleza, y cómo pueden hoy incluirlo en el nivel más fundamental de la física.

La nueva alianza tenía la historia de la física como hilo conductor. *Entre el tiempo y la eternidad* explora la confrontación entre los esquemas conceptuales de la física y el problema del tiempo. Por ello hemos tomado como punto de partida la obra de Boltzmann. Se trata del primer acto de esta confrontación, del momento en el que los físicos comprendieron el carácter radical de los condicionamientos que imponía la dinámica clásica sobre nuestra manera de pensar el devenir.

Para la mayoría de los físicos posteriores a Boltzmann, la verdad del tiempo físico debe estar definida en el nivel de las teorías fundamentales, y de estas teorías debe derivar el estatuto del tiempo en nuestras descripciones fenomenológicas. Nuestra andadura sigue una dirección inversa. En cierto sentido es paralela a la de Bergson, para quien el punto de partida de todo pensamiento en busca de la realidad debía ser nuestra experiencia más íntima, el «sentimiento que tenemos de nuestra evolución y de la evolución de todas las cosas en la duración pura» [2]. No obstante, nuestro punto de partida no será la evidencia de nuestra «experiencia íntima», sino una evidencia inmanente a la propia física: la de que no solamente el conjunto de las descripciones físicas fenomenológicas afirman la flecha del tiempo, sino

[2] H. Bergson, *L'Evolution Créatice*, en *Œuvres*, Paris, PUF, 1970, p. 534. Edición española: *La evolución creadora*, Espasa Calpe, Madrid, 1985, y Planeta-Agostini, 1985.

que en la actualidad nos conducen a comprender un mundo en devenir, un mundo en el que la «emergencia de lo nuevo» adquiere una significación irreductible. En lugar de tratar de «deducir» el tiempo fenomenológico a partir del tiempo «fundamental», nosotros pondremos en cuestión la concepción del tiempo físico en las teorías fundamentales a partir de la evidencia fenomenológica.

Nuestra andadura, en la medida en que invierte la relación habitual entre «fundamental» y «fenomenológico» que llevaba a juzgar la evidencia fenomenológica a partir de las teorías fundamentales, plantea inmediatamente la cuestión de la autoridad que históricamente se le ha conferido a estas teorías. ¿Cómo entender que de un problema meramente «técnico» —la imposibilidad de definir una función que la evolución de un sistema dinámico haga crecer con el tiempo, como es el caso de ia entropía— haya podido nacer esta afirmación de consecuencias casi inconcebibles: que la diferencia entre pasado y futuro no tiene realidad objetiva? ¿Cómo entender la singularidad cultural que ha permitido a la física negar una evidencia tan abrumadora que ninguna cultura la había puesto en cuestión hasta entonces? A esta cuestión están dedicados los dos primeros capítulos de nuestro ensayo.

Los capítulos 3 y 4 de *Entre el tiempo y la eternidad* exploran el desarrollo contemporáneo de esta ciencia de los procesos disipativos productores de entropía que, tras Boltzmann, se interpretó como relativa únicamente al carácter aproximado de nuestras observaciones y cálculos. Mostraremos cómo esta ciencia se ha convertido hoy día en ciencia del devenir. no en el sentido en el que ella proporcione un modelo general del devenir al que deban someterse las otras ciencias, sino en el sentido en que ella descubre a partir de sus propios objetos las condiciones sin las que ninguna evidencia, ya sea biológica o social. puede definir el devenir: la irreversibilidad, las probabilidades, la coherencia.

Hemos dedicado un amplio espacio, en estos capítulos, a los nuevos conceptos de atractor, horizonte temporal y caos. cuya importancia se afirma cada día con más claridad. Realmente se trata de nuevos instrumentos de pensamiento, que generan preguntas y perspectivas inesperadas e inducen aproximaciones entre campos a priori dispares. A partir de ahora, estos instru-

mentos renuevan lo que entendemos por «explicar» en las ciencias de la Naturaleza. En particular, mostraremos en qué medida son capaces de abrir el camino que podría llevarnos a una comprensión no reductora de la aparición de la vida a partir del mundo de los fenómenos físico-químicos.

El quinto capítulo vuelve al problema de Boltzmann y a la concepción según la cual la irreversibilidad sólo sería una propiedad fenomenológica, determinada por las aproximaciones que introducimos en nuestro modo de describir la Naturaleza. La fecundidad de la física de los sistemas disipativos hace insostenible esta concepción. Sin embargo, el hecho de que las leyes de la dinámica parecen ignorar la flecha del tiempo plantea un problema que será el leitmotiv de nuestro libro: el tiempo irreversible no puede «nacer» en el seno de una realidad reversible. O llegamos a identificar el tiempo irreversible en todos los niveles o no podremos comprenderlo en ninguno.

Mostraremos cómo el renacimiento de la dinámica clásica, centrado en torno a la noción de inestabilidad, permite definir los sistemas dinámicos reversibles como casos límites particulares y ya no como modelos representativos del comportamiento dinámico. Desde esta perspectiva retomaremos el problema de Boltzmann, es decir el problema de la relación que mantiene la dinámica con la teoría cinética, la ciencia a partir de la que Boltzmann construyó su modelo microscópico de la entropía. Como veremos, no solamente han perdido su validez las objeciones que se le pusieron a Boltzmann sino que podemos dar un carácter más radical a la interpretación que él proponía. En efecto, las colisiones en el seno de un sistema formado por un gran número de partículas, como los estudia la teoría cinética, no constituyen por sí solas el mecanismo microscópico de la evolución irreversible de dicho sistema hacia el equilibrio. La irreversibilidad no es «creada» por condiciones macroscópicas de no-equilibrio; son las condiciones macroscópicas de equilibrio las que impiden que la flecha del tiempo, siempre presente a nivel macroscópico, se manifieste con efectos macroscópicos.

En el séptimo capitulo abordaremos la cuestión de la mecánica cuántica, la ciencia que, en el siglo XX, ha reemplazado a la dinámica clasica, como vía de acceso al mundo microscópico. Aquí, como ya hemos subrayado, no podemos limitarnos a una nueva interpretación del significado y alcance de las ecuaciones

fundamentales. Estas suponen de hecho la validez general del modelo cuyos límites ha puesto de manifiesto el renacimiento de la dinámica, el modelo del sistema dinámico «integrable» con comportamiento determinista y reversible. Como mostraremos, en este modelo está el origen de la estructura dualista de la teoría cuántica: por un lado una ecuación fundamental, la ecuación de Schródinger, que es determinista y reversible; por otro, su «reducción», irreversible, que permite predecir en términos de probabilidades los resultados posibles de nuestras medidas. Consecuencia de tal estructura es que la mecánica cuántica parece conferir un papel esencial al acto de observación e indicar que seríamos nosotros, los observadores, quienes, con nuestras medidas, introduciríamos las probabilidades y la irreversibilidad en un mundo que, sin nosotros, sería determinista y reversible.

Esta estructura tan particular de la mecánica cuántica ha suscitado mucha controversia. Nuestra investigación nos ha conducido a dar un sentido preciso a lo que Popper había expresado como un «sueño metafísico»: «Probablemente, aun en ausencia de "sujeto observador" que experimentase e interfiriese con él, nuestro mundo sería tan indeterminista como lo es» [3].

La primera formulación de la teoría cuántica, debida a Bohr, Sommerfeld y Einstein, confería al suceso aleatorio un papel central. El «salto» del electrón de una órbita a otra no respondía a una ley determinista sino a una descripción probabilista, como las colisiones en la teoría cinética clásica. Mostraremos que son estos sucesos cuánticos los que imponen un límite a la validez de la mecánica cuántica actual. Al igual que las colisiones, estos sucesos implican el abandono del modelo de «sistema integrable». La nueva formulación a la que hemos llegado les devuelve la significación intrínseca que tenían en la primera teoría cuántica y permite afirmar que el más simple de los sistemas cuánticos, el átomo de hidrógeno, está ya marcado por la flecha del tiempo.

La teoría cuántica es hoy día la teoría física con mejor confirmación experimental. Por ello nos parece especialmente interesante que la nueva formulación que vamos a describir permite predecir desviaciones respecto a las predicciones de la teoría cuántica usual. Teniendo en cuenta el desarrollo actual de

[3] K. Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Totowa, New Jersey, Rowman and Littelfield, 1982, p. 177. Edición española: *Teoría cuántica y el cisma en Física*, Tecnos, Madrid, 1985.

las técnicas experimentales, estas posibles desviaciones deberían poder ser observadas en los próximos años. En cualquier caso, es claro lo que está en juego: ¿tiene un sentido la noción de suceso en el nivel fundamental? ¿Permite la mecánica cuántica definir una irreversibilidad intrínseca, independiente del acto de observación? Esta pregunta es la misma que subyacía en *La nueva alianza:* ¿debemos reconocer que el tiempo separa al hombre de la Naturaleza, o bien podemos construir un modo de inteligencia que se abriría a la idea del tiempo humano como expresión exacerbada de un devenir que compartimos con el Universo?

Acabamos de mencionar el Universo. Uno de los rasgos más notables de la física del siglo XX es que ha hecho del Universo un objeto de ciencia. Así, la cuestión del tiempo se debe plantear igualmente a propósito del Universo. El séptimo capítulo de este libro mostrará el vínculo entre esta cuestión y lo que John Wheeler ha calificado como «la mayor crisis de la física»: la necesidad, que se deriva de los modelos cosmológicos actuales, de concebir en el origen del Universo una singularidad, el «Big Bang», que escapa a nuestras teorías físicas.

La relatividad general, sobre la que se basa el modelo cosmológico hoy dominante, el modelo «standard», introdujo la idea revolucionaria de una relación entre el espacio-tiempo y la materia. Pero esta relación se concibe como esencialmente simétrica: la presencia de materia determina una curvatura del espacio-tiempo, y esta curvatura determina el movimiento de aquella materia. La relatividad general no da más sentido a la irreversibilidad de lo que lo hace la teoría newtoniana del movimiento de la que es heredera, y, en particular, no permite explicar la gigantesca producción de entropía que, como hoy sabemos, ha marcado el nacimiento de nuestro Universo. Según el enfoque que presentaremos aquí, esta producción de entropía es el verdadero «precio» del paso a la existencia de nuestro Universo material y un Universo vacío. Como veremos, la posibilidad de definir esta diferencia y este paso a la existencia nos ha llevado a una generalización de las ecuaciones de Einstein que permite describir un proceso irreversible de *creación* de materia. La singularidad inicial que impone el modelo standard podría entonces ser sustituida por una *inestabilidad* que conduciría a una creación simultánea de la materia y la entropía de nuestro Universo.

El sueño de Einstein fue siempre la unificación de la física, el descubrimiento de un principio único que diera su inteligibilidad a la realidad física. Este sueño condenaba al devenir a no ser, para la física, más que un obstáculo, una ilusión a superar. Hoy día, el devenir irrumpe allí mismo donde este sueño habia encontrado su más grandiosa expresión, en la simetría de las relaciones instituidas por la relatividad general entre la materia y el espacio-tiempo. La inestabilidad inicial que hemos invocado hace del Universo el producto de una ruptura de simetría entre el espacio-tiempo, por una parte, y la materia, en la otra. El nacimiento de nuestro Universo material se encuentra entonces bajo el signo de la irreversibilidad más radical, la del desgarramiento del tejido liso del espacio-tiempo generando a la vez la materia y la entropia.

Así pues, el tiempo irreversible penetra hoy día en todos los niveles de la física y permite entrever la posibilidad de una coherencia nueva articulada en torno a ese devenir que la física de ayer consideraba un obstáculo. El título de nuestro libro *Entre el tiempo y la eternidad* traduce esta radical transformación conceptual. Desde sus orígenes, la física ha estado desgarrada por la oposición entre tiempo y eternidad: entre el tiempo irreversible de las descripciones fenomenológicas y la eternidad inteligible de las leyes que nos debían permitir interpretar estas descripciones fenomenológicas. Hoy día, el devenir y la eternidad ya no se oponen pero, no obstante, el problema de la eternidad no ha abandonado la física. Muy al contrario resurge, corno veremos, bajo una nueva luz, en la posibilidad de un eterno volver a empezar, de una sucesión infinita de universos que revela la eternidad incondicionada de esta flecha del tiempo que confiere a nuestra física su nueva coherencia.

Esta reinvención de la articulación entre tiempo y eternidad manifiesta la fecundidad de la tradición física, ayer portadora de una negación radical del tiempo y hoy capaz de renovarse para dar un sentido al devenir. Del mismo modo nos hace notar la pertenencia de esta tradición a la cultura occidental, también marcada por la cuestión de la relación entre tiempo y eternidad.

Como subrayábamos en *La nueva alianza*, el ideal de eternidad del que la física era portadora pareció imponer un trágico cara a cara entre el hombre, cuya libertad supone y

afirma el tiempo, y un mundo pasivo, dominable y transparente al conocimiento humano. El desarrollo de las ciencias ha contribuido asi a fijar en oposiciones insuperables las tensiones que marcan, desde su origen, a la cultura occidental o, lo que es lo mismo, a agotar el diálogo tan fecundo en ideas y en problemas hasta finales del siglo XVIII, entre ciencia y filosofía.

Reemprender este diálogo nos parece fundamental. Sorprende constatar hasta qué punto es hoy normal que los científicos cuando buscan la manera de reflexionar sobre la significación existencial de su actividad, se vuelven hacia las filosofías orientales. Así Schródinger, uno de los mayores físicos del siglo XX, expuso una «concepción del mundo» inspirada esencialmente por los Veda [4]. Los conceptos y conocimientos creados por la ciencia no tenían, afirmaba, ninguna relación con una «concepción filosófica del mundo». Otros, como David Bohm, tratan de mostrar, por el contrario, que más allá del lenguaje dualista que las ciencias han heredado de la tradición occidental, su desarrollo, en particular el de la física cuántica, nos conduce a descubrir los caminos de la mística oriental. Desde luego nosotros no creemos que las ciencias modernas estén condenadas a mantener relaciones exclusivamente con la tradición occidental. No obstante, pensamos que la física no tiene por qué «liberarse» de esta tradición que marca, más allá de tal o cual doctrina, la búsqueda arriesgada y apasionada de las relaciones entre conocimiento y significación, entre saber y experiencia.

Sin embargo no se trata, por nuestra parte, de proponer una «visión científica del mundo» que pudiera unificar ciencia y filosofía, suprimir las diferencias y las tensiones. Una «visión científica del mundo», cualquiera que sea su contenido, es por definición cerrada, portadora de certezas, privilegiando las respuestas frente a los problemas que las han suscitado. No es una «visión del mundo» lo que quisiéramos compartir, sino una visión de la ciencia. Con el mismo título que el arte y la filosofía, la ciencia es ante todo experimentación, creadora de preguntas y significados. Ella no podrá decirnos qué «es» el tiempo mucho mejor de lo que nos dice la filosofía pero, como la filosofía, la ciencia tiene como problema el tiempo, la creación de una

[4] E. Schrödinger, *Ma conception du monde - Le Veda d'un physicien*, colección «Science et Conscience», París, Mercure de France-Le Mail, 1982. Edición española: *Mi concepción del mundo*, Tusquets, Barcelona, 1988.

coherencia entre nuestra experiencia más íntima, que es la del tiempo, y nuestras formas de describir el mundo, y nosotros mismos que hemos emergido de este mundo.

Esta visión de la ciencia tiene, seguramente, un alcance utópico, igual que la «nueva alianza» entre los saberes a la que apelaba nuestra obra precedente. Ella refleja la necesidad que sentimos de liberarnos de la imagen, todavía dominante hoy día, de una racionalidad científica neutra, destinada a destruir lo que no puede comprender y contra la que deberían ser defendidas las cuestiones y las pasiones que dan su sentido a la vida humana. Refleja también la convicción profunda, que ha guiado la obra científica de uno de nosotros, de que son las generalizaciones prematuras, y no su verdad, las que han conducido a la ciencia a oponer al hombre y al mundo que trata de comprender. El libro que presentamos ahora es el fruto de un largo camino que no hubiera sido posible sin un compromiso alimentado por una cuestión que era a la vez e indisolublemente, científica, filosófica y existencial. Que este camino conduzca hoy a integrar en el corazón de la física una problemática que parecía excluida de ella por definición, basta como testimonio de que la física es obra humana, y no destino implacable —una obra que no cesa de inventar el sentido de la doble condición que la origina y la fecunda, la herencia de su tradición y el mundo que ella interroga *.

* Al concluir esta introducción quisiéramos expresar nuestro agradecimiento a nuestros colegas de Bruselas y Austin que han contribuido de manera decisiva a las investigaciones expuestas en este libro, y en particular a I. Antoniou, J. Géheniau, E. Gunzig, M. Mareschal, F. Mayné, B. Misra, G. Nicolis, S. Pahaut y T. Petrosky. Asimismo, expresamos nuestra gratitud a Madame Raoul-Duval por la paciencia e interés incansables que nos ha dispensado.

Capítulo 1

EL TIEMPO CUESTIONADO

Hace ochenta años aparecía un libro que ha marcado la historia de las relaciones entre ciencia y filosofía y que todavía hoy suscita discusiones y controversias, *La evolución creadora* de Henri Bergson. Contrariamente a la actitud de muchos filósofos frente a la ciencia, Bergson no se interesaba por problemas abstractos como la validez de las leyes científicas, los límites últimos del conocimiento..., sino por lo que esta ciencia nos dice sobre el mundo que pretende comprender. Y su veredicto señalaba la muerte de esta pretensión. La ciencia, afirma, ha sido fecunda cada vez que ha logrado negar el tiempo, darse objetos que permiten afirmar un tiempo repetitivo y reducir el devenir a la producción de lo mismo por lo mismo. Pero cuando abandona sus objetos predilectos, cuando intenta llevar al mismo tipo de inteligibilidad aquello que en la Naturaleza manifiesta el poder de invención del tiempo, la ciencia sólo es una caricatura de sí misma.

El juicio de Bergson causó escándalo. Se podía permitir que la ciencia no podría penetrar nunca en los dominios tradicionalmente reservados a la filosofía, tales como el espíritu humano, la libertad o la ética. Pero de aceptarlo, es el dominio en el que la ciencia es fecunda, y no el reservado a la filosofía, el que se reduce como una piel de zapa. Es, en efecto, a partir de nuestra experiencia más íntima, la experiencia de la duración, y no a

partir de los objetos privilegiados por nuestra ciencia, como podemos esperar comprender la Naturaleza de la que somos solidarios.

Asi. el tiempo vivido, el tiempo que constituye nuestra propia vida, no nos opone, según Bergson, a un mundo «objetivo»; por el contrario, este tiempo pone de manifiesto nuestra solidaridad con lo real. «Uno de los objetivos de *La evolución creadora* es el mostrar que el Todo es de la misma naturaleza que el yo, y que es aprehendido mediante una profundización cada vez más completa de uno mismo» [1].

En la medida en que pretendía proponer un camino alternativo al del conocimiento científico, Bergson fracasó. El «sentimiento que tenemos de nuestra evolución y la de todas las cosas en la duración pura» [2] no ha podido transformarse, en contra de lo que él esperaba, en un método de investigación capaz de alcanzar la precisión y certidumbre del que guía a las ciencias [3]. Y sin embargo, precisamente porque ya no creemos en la solución que él veía dibujarse, en la posibilidad de «otra» ciencia que tomara como punto de partida la intuición de la duración concreta, el problema planteado por Bergson está presente en este libro, como lo ha estado siempre en la obra científica de uno de nosotros. ¿Podemos apelar al juicio de Bergson de que el conocimiento científico, y en particular el conocimiento físico, está condenado a oponer entre sí al mundo descrito y a quien lo describe?

El juicio de Bergson pasaba por alto, creemos nosotros, el hecho de que la física no es algo dado, a partir de lo cual podría plantearse el problema de la naturaleza del conocimiento científico, sino una *obra* que conjuga, como toda obra creadora, la libertad de la imaginación y la exploración rigurosa y exigente del mundo de nuevas posibilidades que supone la invención. Se puede decir incluso que, procedente de la alianza entre invención teórica y experimento, la física lleva a un grado extremo estos dos aspectos complementarios que son la libertad y la necesidad.

[1] H. Bergson, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, artículo «Inconnaisable», citado por H. Gouhier en su introducción a las *OEuvres* de Bergson, Paris, PUF, 1970, p. XXIII.

[2] H. Bergson, *L'Evolution Creatrice*, en *OEuvres, op. cit.*, p. 534.

[3] H. Bergson, *La Pensée et le Mouvant*, en *OEuvres, op. cit.*, p. 1286. Edición española: *El pensamiento y lo moviente*, Espasa Calpe, Madrid, 1976.

Su capacidad de invención se manifiesta en la creación de lenguajes nuevos, en particular de lenguajes matemáticos que permiten introducir distinciones inaccesibles al lenguaje natural. Y es relanzada sin cesar por el descubrimiento de fenómenos inesperados, que desafian a la imaginación e imponen a las teorías y a las predicciones de los físicos el descubrimiento de sus límites. Como veremos, esto es particularmente cierto para la física del siglo XX, que ha sido, para los físicos, el siglo de las sorpresas.

En esta perspectiva, que hace de la física no un modelo sino una «interface» inventiva entre los hombres y el mundo de los fenómenos, es donde nos vamos a situar. Intentaremos mostrar cómo hoy la física ha podido crear —sin dejar de cumplir los requisitos que han conferido rigor y exigencia a su exploración— nuevas significaciones, nuevas cuestiones que la abren a la experiencia humana del tiempo que Bergson la creía condenada a ignorar. A lo largo de este ensayo intentaremos describir no el nacimiento sino una transformación profunda del ideal de inteligibilidad que orienta el desarrollo de esta ciencia y, al mismo tiempo, de la lectura que podemos hacer de su tradición.

Los orígenes de la física están marcados por una contingencia irreductible que no remite solamente a la historia de los hombres sino también a la Naturaleza, al hecho de que ella ha dado sentido, hasta cierto punto, a los ideales de inteligibilidad de quienes la han interrogado. Consideremos el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. La historia de nuestra física ha estado condicionada por el hecho de que las fuerzas de interacción entre la Tierra, la Luna y los demás planetas pueden despreciarse en primera aproximación, es decir, que la órbita terrestre puede responder a la idealización de un sistema de dos cuerpos (Tierra-Sol). Si no hubiera sido así, el cielo no hubiera ofrecido a los hombres el espectáculo de los movimientos periódicos regulares que dio impulso a la astronomia clásica. ¿Hubiera nacido una ciencia probabilística, en lugar de la «mecánica celeste», para dar cuenta de la complejidad de los movimientos planetarios? Del mismo modo, la física de Galileo remite al hecho de que vivimos en un medio en el que normalmente las fuerzas de rozamiento son débiles. Si, como los delfines, hubiéramos vivido en un medio más denso, la ciencia del movimiento habría tomado una forma diferente. Ejemplos

análogos pueden multiplicarse: nosotros no debemos la creación de nuestros esquemas conceptuales únicamente a nuestra inteligencia, sino al hecho de que, en este mundo complejo, algunos «objetos» se destacan naturalmente y han captado la atención de los hombres, suscitado el desarrollo de técnicas y la creación de lenguajes que hacen inteligible su regularidad.

Hoy día, la ciencia es capaz de superar la contingencia que presidió su nacimiento. Podemos admirar la simplicida del movimiento de los planetas sin dejarnos engañar por ella, ya que estamos mejor preparados para comprender su carácter particular, casi singular. En este ensayo quisiéramos describir esta transformación de la mirada del físico, a fin de compartir con el lector el sentimiento de que vivimos en un momento privilegiado. No solamente la física nos abre hoy un mundo que ya no es ajeno a nuestra experiencia, a nuestros saberes y a nuestras prácticas, sino que nos permite también comprender mejor su pasado, la singular complicidad de los objetos que guiaron sus primeros pasos, los límites del ideal de inteligibilidad que pudieron inspirar.

Sin embargo, antes de comprometernos en esta exploración de la física contemporánea, quisiéramos dedicar algunas páginas a un retorno al pasado. Si a principios del siglo XX Bergson y tantos otros pudieron hacer del tiempo el problema crucial a partir del cual se podría dar un juicio global sobre la ciencia y sus límites, no fue por azar. En efecto, por primera vez llegaban a afrontar de manera directa y explícita la cuestión del tiempo y el ideal de inteligibilidad de la tradición física.

En *La nueva alianza* presentábamos ya un cuadro de la historia de la física centrado en esta cuestión del tiempo. Mostrábamos cómo, en el curso de la segunda mitad del siglo XIX, se desgajaron dos grandes concepciones del devenir físico, resultados respectivos de la dinámica nacida en el siglo XVII y de la termodinámica del siglo XIX. Curiosamente, estas dos concepciones correspondían a visiones opuestas del mundo físico. Desde el punto de vista de la dinámica, devenir y eternidad parecían identificarse. Del mismo modo que el péndulo perfecto oscila en torno a su posición de equilibrio, el mundo regido por las leyes de la dinámica se reduce a una afirmación inmutable de su propia identidad. En cambio, el universo termodinámico es el

universo de la degradación, de la progresiva evolución hacia un estado de equilibrio definido por la uniformidad, la nivelación de toda referencia. Aquí, el péndulo deja de ser perfecto y el rozamiento le condena irrevocablemente a la inmovilidad del equilibrio. A la eternidad dinámica se opone así el «segundo principio de la termodinámica», la ley del crecimiento irreversible de la entropía formulada por Rudolf Clausius en 1865; al determinismo de las trayectorias dinámicas se opone el determinismo igualmente inexorable de los procesos que nivelan las diferencias de presión, de temperatura, de concentración química y que llevan irremisiblemente un sistema aislado a su estado de equilibrio, de máxima entropía.

Subrayamos cómo la idea de definir una actividad por la destrucción que hace de las inhomogeneidades que la generan, es decir, de sus propias condiciones de existencia, de definirla en suma como llevando irrevocablemente a su propia desaparición, había marcado al siglo XIX con una ansiedad casi escatológica. Nuestro mundo está condenado a la muerte térmica. Nuestras sociedades agotan sus recursos, están condenadas a la desaparición.

Sin embargo, sería un error pensar que el segundo principio de la termodinámica fue únicamente fuente de pesimismo y angustia. Para algunos físicos, como Max Planck y sobre todo Ludwig Boltzmann, fue también el símbolo de un giro decisivo. La física podía por fin definir la Naturaleza en términos de devenir; ella iba a poder describir, a semejanza de otras ciencias, un mundo abierto a la historia.

Sorprende, en efecto, constatar que en la época en que la física, gracias al segundo principio de la termodinámica, anuncia la evolución irreversible allí donde parecía reinar la eternidad, las ciencias y las cultura descubren por todas partes el poder creador del tiempo) Es la época en la que todos los rasgos de la cultura humana, las lenguas, las religiones, las técnicas, las instituciones políticas, los juicios éticos y estéticos, se perciben como productos de la historia, y en la que la historia humana se lee como el descubrimiento progesivo de los medios de dominar el mundo. Es la época en la que la geología y la paleontología nos enseñan que nuestra Tierra y todo lo que parecía el marco fijo de nuestra existencia, los océanos, las montañas, las especies vivas, son el fruto de un larga historia jalonada de destrucciones y creaciones.

Para el físico Ludwig Boltzmann, el siglo XIX fue «el siglo de Darwin», el siglo de quien mostró que la invariancia de las especies vivas era sólo una apariencia. Y sin embargo, para la mayor parte de los físicos, el nombre de Boltzmann evoca un logro en alguna manera antitético al de Darwin: fue él quien habría mostrado que la irreversibilidad sólo era una apariencia más allá de la cual reina la eternidad invariante de las leyes de la dinámica. El drama de Ludwig Boltzmann fue que intentó en física lo que Darwin había llevado a cabo en biología —dar un sentido al tiempo de la evolución al nivel de descripción fundamental— para llegar a un callejón sin salida y capitular finalmente ante la exigencia de eternidad de la dinámica.

De inmediato se impone la similitud entre la aproximación de Darwin y la de Boltzmann. Darwin había transformado el objeto de la biología, había mostrado que cuando se estudian las *poblaciones* vivas y su historia, y no ya la de los individuos, es posible comprender cómo la variabilidad individual sujeta a la selección genera una «deriva» de la especie, una progresiva transformación de lo que, a escalas de tiempo individuales, se impone como dado. Análogamente, Boltzmann trataba de demostrar que en una población numerosa de partículas, el efecto de las colisiones puede dar un sentido al crecimiento de la entropía y, por consiguiente, a la irreversibilidad termodinámica.

En 1872, Boltzmann presentó su famoso «teorema H»[4]. La función H traduce el efecto de las colisiones que, en todo instante, modifican las posiciones y velocidades de las partículas de un sistema. Se construye de modo que decrezca monótonamente con el tiempo hasta alcanzar un mínimo. En este momento se ha llegado a una distribución de las velocidades y posiciones de las partículas que ya no será modificada por colisiones posteriores. Boltzmann había construido así un modelo microscópico de la evolución irreversible del conjunto de partículas hacia un estado de equilibrio. Las colisiones entre las partículas constituyen el mecanismo que produce la desaparición progresiva de cualquier «diferencia» inicial, es decir, de cualquier desviación respecto de la distribución estadística de equilibrio.

Volveremos, en el capítulo 3, sobre la aparente contradicción

[4] Para más detalles véase el capítulo quinto, y también *La nueva alianza, op cit.*, capítulos cuarto y séptimo.

entre las teorías de Darwin y Boltzmann. Ciertamente, ambas sustituyen el estudio de individuos por el de poblaciones, y ponen en evidencia la relación entre variaciones «pequeñas» (variabilidad de los individuos, colisiones microscópicas) y evolución de conjunto correspondiente a una escala de tiempos larga, pero la primera intenta explicar la aparición de especies adaptadas a su entorno de modos cada vez más complejos y diversos, mientras que la segunda describe una evolución hacia la uniformidad. Lo que nos gustaría subrayar aquí es la divergencia entre los destinos que tuvieron ambas teorías. La evolución darwinista triunfó, en medio de encarnizadas controversias entre biólogos y estadísticos, de críticas y dificultades, y en ella se basa actualmente nuestra comprensión de los seres vivos. Por el contrario, la interpretación boltzmanniana sucumbió a sus críticas. Boltzmann fue arrinconado poco a poco hasta reconocer que no había logrado dar una interpretación microscópica de la irreversibilidad. Una evolución «antitermodinámica», en el curso de la cual la entropía disminuiría y las diferencias se ahondarían en lugar de nivelarse, seguía siendo posible físicamente con el mismo derecho que la evolución termodinámica observada.

La situación a la que se vio enfrentado Boltzmann era profundamente dramática. Ya hemos dicho que él estaba convencido de que entender el Universo significa entenderlo en su carácter histórico, y que la irreversibilidad definida por el segundo principio tenia así un sentido fundamental. Pero él era también heredero de la gran tradición de la dinámica. Y él descubría que esta tradición entraba en conflicto con cualquier tentativa de dar un sentido intrínseco a la «flecha del tiempo»[5].

Visto retrospectivamente, el drama que vivió Boltzmann, obligado a elegir entre su intuición del tiempo y su fidelidad a la tradición física, se nos presenta como particularmente significativo. Por una parte, el hecho de que su tentativa estaba condenada al fracaso parece ahora evidente: todos aprendemos, ya en la

[5] La expresión «flecha del tiempo» se debe a Eddington en *The Nature of the Physical World* (publicada en 1928 y reeditada a partir de 1958 por The University of Michigan Press, Ann Arbor). Traducción castellana: *La naturaleza del mundo físico*, Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1945. En este notable libro, Eddington prevé que el futuro podría asistir al fin de la preminencia en física de las leyes «primarias» (deterministas) en beneficio de las leyes «secundarias» (estadísticas y que dan sentido a la irreversibilidad termodinámica).

enseñanza elemental de la física, que una trayectoria no solamente es determinista sino también intrínsecamente reversible y que ella no permite establecer ninguna diferencia entre el pasado y el futuro; tratar de explicar lo irreversible por lo reversible aparece entonces, como lo señaló Poincaré [6], como un error que la sola lógica basta para condenar. Pero, por otra parte, hoy sabemos cómo puede superarse esta aparente contradicción lógica. Estamos en condiciones de responder a las críticas que condenaron el modelo de Boltzmann, pero esta respuesta ha exigido una transformación fundamental en el modo de conceptualización de la dinámica.

Abordaremos esta cuestión en el capítulo 5. Ante todo quisiéramos elucidar aquí este episodio crucial de la historia de la física, en el curso del cual el modo de conceptualización de la dinámica clásica reveló sus exigencias y sus implicaciones. ¿Cómo comprender que Boltzmann, igual que la mayor parte de sus contemporáneos, esperara poder dar un sentido *dinámico* a la irreversibilidad? ¿Cómo no «vieron» desde el principio lo que hoy nos parece evidente: que el tiempo de la dinámica no solamente afirma el encadenamiento determinista de causas y efectos sino también la equivalencia esencial entre las dos direcciones del tiempo, la que nosotros conocemos y que define nuestro futuro, y la que podemos imaginar cuando nos representamos un sistema que «remonta» hacia su pasado?

En principio quizá fuera preciso subrayar el carácter casi inconcebible de esta idea de reversibilidad dinámica. La cuestión del tiempo —de lo que preserva, de lo que crea, de lo que destruye su transcurso— ha estado siempre en el centro de las preocupaciones humanas. Muchas especulaciones han puesto en duda la idea de novedad, afirmando el encadenamiento inexorable de causas y efectos. Muchos saberes místicos han negado la realidad de este mundo cambiante e incierto, y han definido el ideal de una existencia que permite escapar al dolor de la vida. Por otra parte sabemos la importancia que tuvo en la Antigüedad la idea de un tiempo circular, que vuelve periódicamente a sus orígenes. Pero incluso el eterno retorno está marcado por la flecha del tiempo, como el ritmo de las estaciones o el de las

[6] H. Poincaré, en *Comptes Rendus de l'Academie des sciences*, vol. 108, París, 1889, p. 550.

generaciones humanas. Ninguna especulación, ningún saber ha afirmado jamás la equivalencia entre lo que se hace y lo que se deshace, entre una planta que brota, florece y muere, y una planta que resucita, rejuvenece y vuelve a su semilla primitiva, entre un hombre que madura y aprende y un hombre que poco a poco se hace niño, después embrión, después célula.

Sin embargo, desde su origen, la dinámica, la teoría física que se identifica con el triunfo mismo de la ciencia, implicaba esta negación radical del tiempo. Esto es lo que reveló el fracaso de Boltzmann y lo que antes de él no se había atrevido a reconocer ninguno de los pensadores que, como Leibniz o Kant, habían hecho de la ciencia del movimiento el modelo de inteligibilidad del mundo.

La imposibilidad de definir una diferencia intrínseca entre el antes y el después, a la que está condenada la dinámica, nos resulta hoy evidente, pero, ya en su origen, estaba a la vez afirmada y disimulada por un principio que, con los trabajos de Galileo, Huyghens, Leibniz, Euler y Lagrange, llegó a ser el propio principio de conceptualización de la dinámica. Leibniz lo bautizó como *principio de razón suficiente.* En términos leibnizianos este principio enuncia la *equivalencia entre la causa «plena» y el efecto «total».*

El principio de razón suficiente no describe solamente un mundo en el que los efectos siguen a las causas, ni siquiera un mundo en el que el encadenamiento de las causas es rigurosamente determinista. Conocemos un gran número de procesos causales y deterministas que contradicen este principio. Por ejemplo, la «ley de Fourier» describe el proceso de difusión del calor y señala su «causa»: la diferencia de temperatura de los puntos entre los que se produce la difusión, él ha anunciado su propia causa: poco a poco ha desaparecido cualquier diferencia de temperatura entre las diferentes regiones del sistema. El punto importante es que esta desaparición es irreversible. La diferencia de temperatura que ha dado lugar al proceso, y que éste ha destruido, se ha perdido sin retorno, *sin haber producido un efecto que permitiera restaurarla.*

La equivalencia entre causa y efecto afirmada por el principio de razón suficiente implica, por el contrario, la reversibilidad de las relaciones entre lo que se pierde y lo que se crea. Un móvil que desciende por un plano inclinado pierde altura pero adquie-

re una velocidad que (en ausencia de rozamiento) es la que necesitaría para subir de nuevo hasta su altura inicia!. Este es el razonamiento que guió a Galileo en la formulación de la ley de caída de los cuerpos, el que Huyghens generalizó, identificando los dos términos de la igualdad entre «causa» y «efecto»: lo que gana un cuerpo cuando cae una altura h no se mide por su velocidad sino por el cuadrado de su velocidad (hoy escribimos $mgh = mv^2/2$, donde m es la masa del cuerpo, h la altura de caída, g la aceleración de la gravedad y v la velocidad). Y Leibniz supo ver en esta igualdad entre causa y efecto el hilo de Ariadna de la naciente dinámica.

La historia de la ciencia del movimiento, desde Galileo hasta Lagrange y Hamilton, confirmó la tesis de Leibniz. E! principio de razón suficiente ha guiado por completo y eficazmente la construcción de lenguajes dinámicos cada vez más potentes. Y contra él chocó Boltzmann, él condenó su tentativa de dar cuenta en términos dinámicos de la asimetría temporal de los procesos termodinámicos. En efecto, una de las objeciones decisivas a la tentativa de Boltzmann fue la de Loschmidt relativa a la inversión de velocidades. Imaginemos que en un momento dado todas las velocidades que animan a los elementos de un sistema se invierten instantáneamente. En este caso, de la misrna forma que el móvil galileano sobre su plano inclinado vuelve a alcanzar su altura inicial, la evolución del sistema dinámico lleva a éste hacia su estado inicial. Las colisiones recrearían entonces lo que las colisiones habían destruido, y restaurarían las diferencias que habían sido niveladas. Así, la evolución generada por las colisiones sólo es irreversible en apariencia. A partir de un estado inicial diferente, las colisiones deben poder recrear lo que destruían las colisiones puestas en escena por Boltzmann.

Boltzmann habia querido comprender en términos dinámicos la irreversibilidad termodinámica, pero e! principio fundador de la dinámica condenó su tentativa al fracaso y le obligó a concluir que en último análisis no se puede atribuir ningún privilegio a las evoluciones que hacen crecer la entropía. A cada evolución dinámica que lleva a un crecimiento de la entropía se puede hacer corresponder, debido a la igualdad entre causa plena y efecto total, la evolución que restauraría las «causas» consumiendo los «efectos».

Hoy, sin embargo, los argumentos que condenaron la tentativa de Boltzmann se revelan menos convincentes. ¿Qué es una causa *plena*, qué es un efecto *total* para e! físico y, más allá de él, para cualquier ser cuyo conocimiento del mundo tiene su origen en observaciones o medidas que se expresan mediante números? Esta interrogante ha cobrado todo su sentido con el descubrimiento de sistemas dinámicos inestables.

Volveremos en los próximos capítulos sobre este desarrollo reciente de la dinámica. Limitémonos aquí a indicar que en adelante se abre una vía para retomar el intento de Boltzmann. Existe, como veremos, para sistemas suficientemente inestables, un «horizonte temporal» más allá del cual no se les puede atribuir ninguna trayectoria determinada. A cualquier estado inicial determinado con una precisión finita dada corresponde un tiempo de evolución a partir del cual sólo podemos hablar del sistema en términos de probabilidades. La inestabilidad dinámica implica así una limitación de la noción de trayectoria que hace caduca la objeción de Loschmidt contra Boltzmann, y permite —volveremos sobre ello— definir la diferencia intrínseca, que Boltzmann había intentado inútilmente formular, entre las evoluciones que llevan a un sistema hacia el equilibrio y la que lo alejan de él.

Volvamos ahora a la situación que debió afrontar Boltzmann, obligado a elegir entre la apertura de la física a la temporalidad y su fidelidad a la dinámica cuyas limitaciones descubría. El eligió la fidelidad. Sustituyó la interpretación dinámica del segundo principio por una *interpretación probabilista*.

Tendremos ocasión de volver sobre la noción de probabilidad. Señalemos aquí que las probabilidades introducidas por Boltzmann remiten a nuestra falta de información. El considera de hecho sistemas complejos formados por muchos millones de billones de moléculas en movimiento. La evolución de un sistema semejante no puede, evidentemente. ser deducida de las ecuaciones de la dinámica, y es natural hacer la hipótesis de que todos los estados dinámicos posibles tienen la misma probabilidad a priori. Admitido esto, resulta posible contar los estados dinámicos que corresponden a cada situación macroscópica.

Imaginemos por ejemplo un recipiente dividido en dos por un tabique y lleno de moléculas en movimiento que representan

un gas. En este caso, la observación corresponde a la medida de la presión en cada compartimento, por consiguiente al número de moléculas que contiene cada uno de ellos. Supongamos que en el instante inicial, el compartimento de la izquierda está vacio mientras que todas las moléculas se encuentrn en el de la derecha. Abramos un agujero en el tabique. ¿Qué cabe esperar? Entre todas las situaciones observables, una es realizada por la gran mayoría de los estados dinámicos posibles a priori: es el equilibrio de las presiones, la situación en la que existe el mismo número de moléculas en cada compartimento. Podemos deducir entonces que, entre todas las evoluciones dinámicas posibles a priori, el mayor número conducirá a este estado final. Cuando este estado, tanto más probable cuanto más numerosa sea la población, sea alcanzado las moléculas continuarán atravesando el agujero pero, en promedio tantas moléculas pasarán hacia la izquierda como hacia la derecha. El reparto de las moléculas entre los dos compartimentos permanecerá uniforme salvo fluctuaciones. Una «recreación» espontánea de una diferencia de presión entre los dos compartimentos que, al alejar el sistema del equilibrio, correspondería a una evolución con entropía decreciente no sería, en estas condiciones, imposible pero sería de una improbabilidad tanto mayor cuanto mas numerosa sea la población de moléculas.

La interpretación probabilista de Boltzmann refiere así la irreversibilidad que nosotros observamos al carácter grosero, «macroscópico» de nuestras observaciones: quien pudiera seguir el movimiento de cada molécula describiría un sistema reversible; si describimos un sistema que evoluciona irreversiblemente hacia el equilibrio de presiones es porque sólo tenemos en cuenta el número promedio de moléculas que mide la presión en cada compartimento. Por otra parte, según esta interpretación, la irreversibilidad de los procesos que observamos a nuestro alrededor remite a un estado de hecho: sucede que el mundo no es uniforme, no está en su estado «más probable». Vivimos en un mundo «improbable», y la «flecha del tiempo», la posibilidad de definir una diferencia entre el antes y el después es simplemente consecuencia de este hecho. Lo que llamamos «la Naturaleza», el conjunto de procesos entrelazados que comparten con nosotros el mismo futuro, desde el azúcar del que Bergson decía que hay que esperar que se disuelva hasta la planta que brota o el pájaro

que vuela, no es sino la manifestación de la progresiva desaparición de esta desviación respecto del equilibrio.

Pero, ¿cómo explicar esta desviación respecto del equilibrio a la que la Naturaleza y nosotros mismos debemos la existencia? «Tenemos que elegir, escribía Boltzmann, entre dos tipos de representación. O bien suponemos que el Universo entero está en la hora actual en un estado muy improbable. O bien hacemos la hipótesis de que los eones que miden la duración de este estado improbable, y la distancia desde aquí a Sirio, son ínfimos comparados con la edad y las dimensiones del Universo entero. En un Universo semejante, que en conjunto está en equilibrio térmico, y por consiguiente muerto, se encontrarán aquí y allá regiones relativamente pequeñas, del tamaño de nuestra galaxia, regiones (que podemos llamar «mundos») que se desvían significativamente del equilibrio térmico durante intervalos relativamente cortos de estos «eones» de tiempo. Entre estos mundos, se encontrarán algunos cuyos estados son de probabilidad (es decir, entropía) creciente, con la misma frecuencia que otros cuyos estados tienen probabilidades decrecientes. En el seno del Universo en su conjunto, no se pueden distinguir las dos direcciones del tiempo, de la misma manera que en el espacio no hay arriba ni abajo... Creo que esta manera de considerar las cosas es la única que nos permite comprender la validez de la segunda ley y la muerte térmica de cada mundo individual sin invocar un cambio unidireccional del Universo entero desde un estado inicial definido hacia un estado final»[7].

Tal es la conclusión a la que Boltzmann se vio obligado finalmente. Mientras que él había querido interpretar la irreversibilidad del tiempo en términos de leyes fundamentales y hacer entrar la física en el concierto de las ciencias que descubrían la historia, lo que hizo fue reducir la flecha del tiempo a un hecho contingente: el mundo que nosotros observamos sólo es una fluctuación local en un Universo que, globalmente, ignora la

[7] Este texto de Boltzmann figura en su segunda respuesta a E. Zermelo. Este había invocado, contra el teorema H, el «teorema de recurrencia» de Poincaré, que muestra que la evolución de un sistema dinámico le hará volver a pasar por estados tan próximos como se quiera a su estado inicial. Este extracto es citado por K. Popper en *Unended Quest*, La Salle, Ill., Open Court Pub.; trad. francesa: *La Quete inachevée*, Paris, Calmann-Levy, 1981. Edición Española: *Búsqueda sin término*, Tecnos, Madrid, 1977.

dirección del tiempo; en otras regiones del Universo, estadísticamente tan numerosas como las que comparten nuestra flecha del tiempo, la entropía sería decreciente.

¿Podemos siquiera imaginar esos otros mundos? La noción de probabilidad sería allí inutilizable, al menos para predecir el «futuro»: las diferencias se ahondarían espontáneamente, los sistemas se alejarían del equilibrio, lo que para nosotros es milagro estadístico sería allí la regla [8]. ¿Cómo explicar, por otra parte, que no encontremos en nuestro mundo otro tipo de fluctuaciones que darían a las regiones que ocupan una flecha del tiempo opuesta a la nuestra? ¿Por qué una sola flecha del tiempo define todo el Universo observable?

Desde nuestra actual perspectiva estas cuestiones hacen aparecer la solución propuesta por Boltzmann como más fantasmagórica aún que en su época. A fines del siglo XIX las observaciones astronómicas quedaban limitadas a nuestra galaxia. Ahora sabernos que la «micro-región» fluctuante que Boltzmann postulaba debería contener miles de millones de galaxias, todas las que hoy podemos observar y de las que sabemos que comparten nuestra flecha del tiempo. Además, el descubrimiento de Hubble de que las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad proporcional a su distancia, y el descubrimiento por Penzias y Wilson de la radiación de cuerpo negro homogénea e isótropa que baña nuestro Universo, se han aunado para imponernos la concepción de una historia global del Universo marcada por un origen que se remontaría a unos quince mil millones de años. ¿Cómo comprender entonces que el Universo *en su conjunto* haya nacido «lejos del equilibrio»?

Volveremos sobre estas diferentes cuestiones en los capítulos siguientes. Lo esencial aquí era responder a la cuestión planteada

[8] Norbert Wiener ha mostrado que en ninguna situación podríamos comunicar con un universo cuya flecha del tiempo fuese opuesta a la nuestra. Cualquier señal que se nos enviara nos aparecería como un extraño proceso natural, que explicaríamos a *partir de lo que, de hecho, son sus consecuencias. Por ejemplo*, si nos dibujasen un cuadrado (en la arena) veríamos los restos de esta figura como sus precursores, y el cuadrado se nos aparecería como una extraña cristalización —perfectamente explicable— de estos restos. Su significación nos parecería «tan fortuita como los rostros que creemos ver en las montañas o los acantilados». (*Cybernetics*, 2.ª ed., Cambridge, Mass., The MIT Press, 1961, p. 34). Edición Española: *Cibernética*, Tusquets, Barcelona, 1988. (Existe una edición más antigua, aunque con numerosos errores, en Guadiana, Madrid, 1971.) También existe traducción catalana en Científiques Catalanes, Barcelona, 1986.

a propósito de *La evolución creadora:* ¿por qué. a comienzos del siglo XX, la cuestión del tiempo científico surgió en el corazón del diálogo entre ciencia y filosofía? La crítica de Bergson se dirige a una física que ya no es la ciencia que Boltzmann trataba de abrir al problema de la evolución. De hecho, los herederos de Boltzmann han transformado en triunfo lo que Boltzmann vivió como dramático fracaso. La negación de la irreversibilidad del tiempo, que fue para Boltzmann una solución desesperada, llegó a ser, para la mayoría de los físicos de la generación de Einstein, el símbolo mismo de lo que, para ellos, es la vocación de la física: alcanzar más allá de lo real observable una realidad temporal inteligible.

Einstein es quien mejor encarna, sin duda, el ideal que define esta nueva vocación de la física, ideal de un conocimiento que despoja nuestra concepción del mundo de lo que, a sus ojos, sólo era la marca de la subjetividad humana. La ambición de ciertas prácticas místicas ha sido siempre la de escapar a las cadenas de la vida, a los tormentos y decepciones de un mundo cambiante y engañoso. En cierto sentido Einstein hizo de esta ambición la vocación misma del físico y, haciendo esto, la tradujo en términos científicos. Los místicos buscaban *vivir* este mundo como una ilusión; Einstein quiso *demostrar* que es sólo una ilusión, y que la verdad es un Universo transparente e inteligible, purificado de todo lo que afecta a la vida de los hombres, la memoria nostálgica o dolorosa del pasado, el temor o la esperanza del futuro [9].

Como en la época de Boltzmann. hoy estamos en una encrucijada de caminos. Para nosotros la alternativa no se sitúa donde la situó Bergson, sino que nos impone la elección entre un camino que partiría de nuestra «experiencia íntima» y un camino que se atendría a los fenómenos calculables y reproducibles.

[9] Es necesario subrayar, de ahora en adelante, que esta nueva imagen de la física, con su característica discriminación entre las teorías «fundamentales», que ignoran la flecha del tiempo, y las teorías «simplemente fenomenológicas», que le dan sentido, ha resistido a lo que Bernard d'Espagnat ha calificado de descubrimiento, por la mecánica cuántica, de que lo «real» está «velado». Así, para el propio d'Espagnat, la mecánica cuántica no nos permite acceder a lo «real», aunque sin embargo nos da de ello una traducción lo bastante fiel como para que tomemos en serio las informaciones negativas que nos aporta: la «flecha del tiempo» designa una realidad solamente empírica.

Pero quizá ésta sea todavía más radical que aquélla. De hecho, una ciencia que intenta, a partir de una «real» inteligible pero intemporal, reconstruir la verdad objetiva de los fenómenos no podrá ciertamente comprender la «experiencia íntima del tiempo» de Bergson. Pero una ciencia así es también incapaz de dar sentido al conjunto de saberes, de prácticas de cálculo y manipulación al que Bergson oponía esta íntima experiencia. El mundo despojado de la irreversibilidad temporal, de la distinción entre antes y después, es un mundo en el que incluso la ciencia condenada por Bergson pierde todo significado.

Juzgar el mundo en nombre de un ideal que está condenado a hacerlo ilusorio, o intentar construir, a partir de nuestra experiencia de este mundo, un conocimiento pertinente que dé sentido a las distinciones y a los problemas que nos proporcione; tal es la alternativa respecto a la que toma postura este texto. Pero, antes de adentrarnos en la exploración de los nuevos puntos de vista que permiten embarcar la física en la vía que Boltzmann había concebido, demorémonos, durante un capítulo, sobre este extraño destino de la física que, desde su origen, ha fascinado a los mismos que la crearon, y les ha inspirado esta quimera de poder acceder al tipo de saber que Dios, si existiera, tendría del mundo.

Capítulo 2

DIOSES Y HOMBRES

Quizá uno de los aspectos más sorprendentes de ¡a historia de Boltzmann es que la conclusión a la que se vio finalmente obligado que la irreversibilidad no remite a las leyes fundamentales de la Naturaleza sino a nuestra forma grosera, macroscópica, de describirla no suscitó ninguna crisis en el seno de la física. Existe un notable contraste con la acogida que le fue dispensada, algunos años más tarde, a la teoría de la relatividad de Einstein. Mientras que la segunda iba a constituir un acontecimiento cultural capital, capaz de despertar pasiones, interrogantes o confusión, la primera sólo encontró eco inicialmente entre los físicos. Y lo que es más, la mayoría de éstos vieron en ella un trabajo ciertamente notable pero sin alcance revolucionario.

La teoría de la relatividad negaba una noción que. a fin de cuentas, sólo juega un papel secundario en la vida de los hombres. la de la simultaneidad absoluta entre dos sucesos distantes. Incluso cabe señalar que en la época de Einstein hacía poco que esta noción se había introducido en las prácticas humanas. Hasta entonces, sólo el espectáculo del cielo, de las posiciones relativas del Sol. la Luna y los planetas, proporcionaba a sus observadores, astrónomos y marinos, el medio de sincronizar el tiempo en dos lugares diferentes. Con la invención del telégrafo y con el abandono, a finales del siglo XIX. de las horas locales en beneficio de la

hora común del meridiano de Greenwich, los hombres acababan de inaugurar la experiencia de un mundo que vivía el tiempo al unísono. En cambio, la idea de una distinción entre él antes y el después forma parte de nuestra experiencia hasta tal punto que ni siquiera podemos describirla sin presuponer esta diferencia. Esta fue sin duda, como ya hemos subrayado, la razón de que para que los físicos leyeran en sus ecuaciones la negación de la que la dinámica era portadora, fue preciso que la cuestión de los procesos irreversibles les obligara a ello.

¿Cómo explicar entonces que el fracaso de Boltzmann, y la negación de la flecha del tiempo que resultó de ello, no hayan marcado nuestra memoria con el mismo derecho que la relatividad o la mecánica cuántica? ¿Cómo explicar que este fracaso no haya sido reconocido como la primera de las grandes crisis que marcaron el nacimiento de la física contemporánea? Limitémonos a recordar que el descubrimiento de la imposibilidad de dar un sentido a la flecha del tiempo en el marco de la dinámica apareció como la expresión de lo que esta teoría implicaba de hecho desde siempre, y no como un «revolución». En este sentido la utiliza Bergson: ni siquiera hay necesidad de citar a Boltzmann, ya que éste sólo había hecho explícito lo que constituía la verdad esencial de la física.

Pero es preciso ampliar el campo de esta pregunta. Hemos dicho que Boltzmann escogió la fidelidad a la tradición dinámica y a ella sacrificó la intuición del carácter evolutivo del mundo. Ni para él ni para sus herederos, que ratificaron su elección, la dinámica era simplemente un lenguaje científico entre otros, que permitía predecir y calcular con éxito el movimiento de los planetas o de los proyectiles. La dinámica gozaba del prestigio suficiente como para vencer la evidencia del tiempo —no solamente la evidencia resultante de nuestra experiencia subjetiva sino también la que impone el conjunto de los procesos que constituyen la Naturaleza.

La historia de la física no se reduce a la del desarrollo de formalismos y experimentaciones, sino que es inseparable de lo que normalmentee se denominan juicios «ideológicos». De hecho, la elección de Boltzmann nos remite a la propia historia de la física en el seno de nuestra cultura y, en particular, a la excepcional significación intelectual y especulativa que le fue conferida desde sus orígenes.

A este respecto quizá la lectura de *El nombre de la rosa* de Umberto Eco nos enseña más sobre la originalidad de la ciencia nacida en Europa no hace todavía cuatro siglos que muchos tratados de epistemología. Ella nos sumerge, en efecto, en el corazón de la «turbulencia cultural» de finales de la Edad Media. Como veremos, ios físicos actuales describen un régimen turbulento por el largo alcance de las correlaciones que hacen que cada punto del medio turbulento sea sensible a lo que se produce en otros puntos. De forma en alguna medida análoga, Eco nos muestra las implicaciones de largo alcance de los problemas que agitaban el pensamiento medieval. ¿Qué podemos conocer del mundo? ¿Qué nos enseña un nombre? ¿Puede darnos un conocimiento genérico la verdad de un individuo? ¿Basta la investigación de indicios para guiarnos en el laberinto de los fenómenos? Cuestiones semejantes, nos recuerda, despertaban resonancias en los dominios más diversos, desde la política a la ética, la estética o la religión y recíprocamente.

Nadie se sorprende de que el pasado de la geología y los de la biología o la astronomía hayan estado marcados por sus relaciones con lo que la religión definía como saber revelado. El lugar de la Tierra en el mundo, su edad, la aparición de las especies vivas, la propia identidad del hombre, se han atribuido a la actividad del Dios creador antes de convertirse en objeto de investigación científica. Pero es mucho más curioso constatar que una cuestión aparentemente técnica como la de saber si la colisión entre dos cuerpos debe ser entendida a partir de su elasticidad o. por el contrario, a partir de su dureza, haya podido ser relacionada con la cuestión del papel de Dios o de la libertad humana.

Sin embargo, esto es lo que nos muestra la célebre correspondencia entre Leibniz y Clarke. este último portavoz de Newton. Este intercambio de cartas [1] que comenzó en 1715 y terminó con la muerte de Leibniz, asocia inextricablemente registros que cualquier epistemólogo serio trataría de mantener separados. Teoria política: ¿quién es el mejor príncipe, aquél cuyos subditos son lo bastante disciplinados como para que no tenga que

[1] *Correspondance Leibniz-Clarke*, editada por A. Robinet, París. PUF, 1957. Esta correspondencia ha sido editada en castellano por Eloy Rada: *La polémica Newton-Clarke* Taurus. Madrid.

intervenir o, por el contrario, el que interviene sin cesar? Teología: ¿cómo comprender el milagro?, ¿cómo diferenciar las intervenciones en acto de Dios en el mundo del conjunto de sucesos que derivan dei acto inicial de la creación? Etica: ¿es el acto libre un acto inmotivado o susceptible de determinarse contra los motivos más fuertes, o bien sigue siempre la inclinación más fuerte, incluso aunque no seamos conscientes de todos los motivos que nos inclinan a una u otra elección? Cosmología: ¿en qué sentido es infinito el espacio?, ¿el mundo ha sido creado en un instante dado, o bien el tiempo es relativo a la existencia del mundo? Física: las «fuerzas activas» (lo que hoy llamamos energía, cinética y potencial) ¿disminuyen o se conservan?, cuando dos cuerpos blandos chocan y se inmovilizan ¿su «fuerza» se destruye, o bien se trata solamente de una apariencia, quedando de hecho disipada en las partes minúsculas de los cuerpos?

Leibniz y Clarke ponen en relación todas estas cuestiones. En efecto, lo que en ellas se dirime gira siempre, como subrayan los dos protagonistas, en torno a un mismo punto: el alcance y validez del principio de razón suficiente que Leibniz pretende sin límites y que Clarke quiere reducir únicamente a la transmisión puramente mecánica del movimiento (excluyendo incluso las aceleraciones derivadas de las fuerzas newtonianas de interacción).

Leyendo estos textos, uno se sorprende al constatar hasta qué punto Newton, que controlaba de cerca la presentación de su pensamiento por Clarke. era poco «newtoniano». Es Leibniz quien defiende lo que llamaríamos «visión newtoniana» del mundo. Y son Newton-Clarke quienes afirman que cada acción produce un movimiento *nuevo,* un movimiento que no existía antes y que no puede ser entendido a partir de la conservación de la causa en el efecto[2]. Leibniz habla de un mundo en «movimiento perpetuo», de un mundo en el que causas y efectos se entregeneran perpetuamente sin que se pueda decir nunca que el Universo ha recibido un nueva fuerza, es decir, que un cuerpo ha

[2] Para un análisis del concepto newtoniano de fuerza como manifestación de un principio de actividad irreducible a la mecánica. véase E. McMullin. *Newton on Matter and Activity*. Notre Dame. Indiana. University of Notre Dame Press. 1978.

ganado fuerza sin que otro la haya perdido en la misma cantidad. Newton-Clarke hablan de la Naturaleza como de un «trabajador perpetuo», la consideran transida de un poder que la trasciende, evocan fuerzas de interacción que no están sujetas a una ley de conservación sino que reflejan la perpetua intervención de Dios, autor actual de un mundo cuya actividad no cesa de nutrir.

La idea de que el Universo como totalidad escapa a las afecciones del devenir no es en sí una idea nueva. Se la encuentra en particular en Giordano Bruno, donde ella es sinónimo de perfección infinita: «El Universo es así uno, infinito e inmóvil... No se mueve con un movimiento local porque no hay nada fuera de él a donde dirigirse, ya que él lo es todo. No se genera a sí mismo puesto que no hay ninguna otra cosa que pueda desear o buscar, ya que él contiene a todos los seres. No es corruptible, puesto que no existe nada fuera de él en lo que pueda transformarse, ya que él es todas las cosas. No puede disminuir ni aumentar, ya que es infinito... No puede ser alterado de ninguna forma puesto que no hay nada exterior por lo que se pueda padecer y de lo que pudiera ser afectado»[3].

Sin embargo, el Universo tal como Bruno lo describe está concebido de manera puramente negativa: nada que sea susceptible de afectar a un ser finito puede afectarle a él. Por el contrario, Leibniz y Clarke llegan a hacer girar sus argumentos sobre el Universo en torno a la cuestión de saber si un observador más dotado que nosotros podría encontrar, en la partes minúsculas de los cuerpos, el movimiento que parece perderse en una colisión. Esta es la singularidad de la física tal como todavía hoy la conocemos: las discusiones «metafísicas» no se superponen arbitrariamente a cuestiones propiamente científicas, sino que dependen de ellas de manera crucial. La posibilidad de una tal medida, de un tal experimento, aunque sea mental, es susceptible de simbolizar y de poner a prueba los envites de pensamiento más vastos y más ambiciosos. Si las colisiones son ocasión de «pérdidas» de fuerza, lo nuevo tiene lugar en la Naturaleza, sostenían Newton-Clarke frente a Leib-

[3] G. Bruno, Diálogo Quinto, «De la causa», *Opere Italiane*, I, Bari, 1907, citado por E. Leclerc, *The Nature of Physical Existence*, Londres, George Allen and Unwin, 1972.

niz. Si, mediante un experimento mental, se invierten simultáneamente las velocidades de las moléculas de un gas, éste remontará hacia su pasado y, por lo tanto, la flecha del tiempo es sólo una ilusión, debió reconocer Boltzmann. Y en el caso de que Einstein hubiera podido plantear a Bohr un experimento mental en el que posición y velocidad pudieran ser medidas simultáneamente, tanto la estructura de las ecuaciones cuánticas como las implicaciones filosóficas que les atribuía Bohr hubieran sido echadas por tierra.

Max Jammer ha comparado las discusiones entre Bohr y Einstein con la correspondencia entre Leibniz y Clarke: «En ambos casos significó el choque entre dos concepciones filosóficas diametralmente opuestas a propósito de problemas fundamentales de la física; en ambos casos fue un choque entre dos de las mayores inteligencias de su época; y, del mismo modo que la famosa correspondencia entre Leibniz y Clarke (1715-1716) —«quizá el más bello monumento que exista de los combates literarios» (Voltaire)— sólo fue una breve manifestación de la profunda divergencia de opiniones entre Newton y Leibniz, las discusiones entre Bohr y Einstein en el salón del Hotel Metropole de Bruselas * fueron solamente el punto culminante de un debate que prosiguió durante muchos años. De hecho, continuó incluso tras la muerte de Einstein (el 18 de abril de 1955), pues Bohr admitió repetidamente que él continuaba discutiendo mentalmente con Einstein y que cada vez que reflexionaba sobre una idea física fundamental se preguntaba qué hubiera pensado Einstein sobre ello. Y el último dibujo de Bohr en la pizarra de su despacho del castillo de Calsberg, hecho la víspera de su muerte (el 18 de noviembre de 1962), era el esquema de la caja de fotones de Einstein, asociada a uno de los problemas principales suscitados en su discusión con Einstein»[4].

Uno se pregunta a menudo qué influencias culturales marcaron el pensamiento de Einstein, o el de Bohr, que pudieran explicar sus divergencias. Pero, más allá de estas divergencias, el apasionamiento de sus discusiones, la significación emocional e

[4] M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Nueva York, Wiley-Interscience Pub., 1974, pp. 120-121.

* Se refiere a las discusiones mantenidas con ocasión de las Conferencias Solvay (en particular la de 1930) que tenían lugar en Bruselas. [N. del T.]

intelectual que ambos concedían a la cuestión de saber qué tipo de acceso a la realidad abre la física, les hace descendientes del Guillermo de Baskerville que nos presenta Umberto Eco. Podemos hablar sin duda de una racionalidad científica «universal», pero quizá la herencia específicamente occidental hace que las ciencias no se hayan desarrollado solamente como un juego intelectual o como una fuente de prácticas útiles, sino como una búsqueda apasionada de la verdad. Cualesquiera que sean las precauciones epistemológicas con que se rodee este término, cualesquiera que sean los demás factores que llevan a relativizar su alcance (búsqueda de poder, de prestigio, de potencia económica, etc.), persiste este hecho histórico: la ciencia nacida en Occidente no hubiera sido lo que es si no hubiera llevado asociada la convicción de que abre un camino a la inteligibilidad del mundo. Por encima de su oposición, Bohr y Einstein pertenecían a la misma cultura, la misma de la que procede *La nueva alianza* y la misma que reúne, por encima de sus divergencias, a un Jacques Monod, un René Thom o un Bernard d'Espagnat. Aceptar esta tradición, la carga de significación que confiere a la ciencia, las relaciones estrechas y a la vez difíciles que a causa de esto mantiene con la filosofía, no significa afirmar que esta tradición es superior a otras, sino reconocerla como una herencia que nos sitúa.

¿Qué significa entonces comprender el mundo? En sus memorias, Heisenberg recordaba una visita al castillo de Krönberg en compañía de Bohr, y una reflexión de este último: «¿No es curioso que este castillo parezca otro en el momento que imaginamos que Hamlet vivió en él? Como científicos creemos que un castillo consiste sólo en sus piedras y admiramos la forma en que el arquitecto las ha combinado. Las piedras, el tejado verde con su pátina, las tallas en madera de la iglesia forman el castillo. Nada de esto debería cambiar por el hecho de que Hamlet haya vivido aquí, y sin embargo todo parece diferente. De repente, los muros y las murallas hablan un lenguaje completamente distinto... Sin embargo, todo lo que sabemos realmente de Hamlet es que su nombre aparece en una crónica del siglo XIII... Pero todos conocemos las preguntas que Shakespeare le hizo plantearse, las profundidades humanas que se nos

revelaron a través de él; por ello, él también debía encontrar un lugar en la tierra, aquí en Krönberg»[5].

¿Cómo no reconocer, en esta meditación de Niels Bohr, lo que fue el leitmotiv de su vida científica: la inseparabilidad del problema de la realidad y el de la existencia humana? ¿Qué es el castillo de Krónberg al margen de las cuestiones que le planteamos? Las mismas piedras nos pueden hablar de las moléculas que las componen, de los estratos geológicos de los que provienen, quizá de las especies desaparecidas que contienen como fósiles, de las influencias culturales a que estuvo sujeto el arquitecto que construyó el castillo, o de las dudas que persiguieron a Hamlet hasta su muerte. Ninguno de estos saberes es arbitrario pero tampoco ninguno nos permite eludir la referencia a aquél para quien las preguntas toman sentido.

Quizá sea en el diálogo entre Einstein y el poeta y filósofo indio Tagore donde encontramos la expresión más pura del debate entre las dos concepciones de la verdad y la objetividad que subyacen en las discusiones entre Einstein y Bohr. En el curso de este diálogo, Einstein fue llevado a concluir que él mismo era más religioso que su interlocutor. Frente a Tagore. Einstein defendía la idea de una realidad independiente del espíritu humano, independiente de la misma existencia de los hombres sin la que la ciencia no tendría sentido. Jamás, reconocía, será posible probar que una verdad científica tiene una objetividad «supra-humana», y esto constituía asi una forma de creencia religiosa, una creencia indispensable en su vida. Por el contrario, Tagore definía la realidad a la que refiere la verdad, ya sea ésta de orden científico, ético o filosófico, como relativa: «el papel tiene una realidad, infinitamente diferente de la realidad de la literatura. Para el tipo de inteligencia que posee la polilla que devora el papel, la literatura es absolutamente inexistente, pero, para la mente del hombre, la literatura tiene un valor de verdad mayor que el propio papel. Del mismo modo, si existe una verdad desprovista de relación sensible o racional con la mente humana. ella no será nada mientras nosotros sigamos siendo humanos»[6]. Para él, la verdad era así un proceso

[5] W. Heisenberg. *Physics and Beyond. Encounters and Conversations*. Nueva York. Harper Torchbooks. 1972. p. 51. Edición española: *Diálogos sobre Física Atómica*. Biblioteca de Autores Cristianos. Madrid. 1972

[6] R. Tagore. «The Nature of Reality». en vol. XLIX. Calcuta. 1931. pp. 42-

perpetuo y, por definición, abierto, de reconciliación entre el «espíritu humano universal» —es decir, el conjunto de problemas, de intereses, de significados a los que los hombres son o pueden llegar a ser sensibles— y el espíritu tal como está confinado en cada individuo.

El ideal de conocimiento que Einstein describía a Tagore reaparece una y otra vez en la física desde su origen. Si pudiéramos definir la causa «plena» y el efecto «total», decía ya Leibniz, nuestro conocimiento igualaría en perfección a la ciencia que Dios tiene del mundo. Y, todavía hoy, René Thom viene a definir como inevitable la referencia al Dios del determinismo, Dios de un mundo «en donde no hay lugar para lo. informalizable»[7]. Esta elección metafísica de la física se ha traducido en múltiples referencias a un Dios que no juega a los dados, según Einstein, que conoce simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula, según Planck —o a los demonios: el de Laplace, capaz de calcular el pasado y el futuro del Universo a partir de la observación de uno cualquiera de sus estados instantáneos; el de Maxwell, capaz de invertir la evolución irreversible asociada al crecimiento de la entropía manipulando cada molécula individual.

Pero, ¿podemos hoy seguir asimilando esta elección metafísica al ideal del conocimiento científico? ¿Por qué afirmar como necesaria esta peligrosa proximidad entre razón y sinrazón que lleva a la física a identificar como ideal de conocimiento el fantasma de un saber podado de sus propias raíces? Por esto, nosotros, nos orientamos en la dirección definida por Tagore. La objetividad científica no tiene sentido si acaba por hacer ilusorias las relaciones que mantenemos con el mundo. o por condenar como «meramente subjetivos», «meramente empíricos» o «meramente instrumentales» los saberes que nos permiten hacer inteligibles los fenómenos que interrogamos. Einstein decía que el hecho de que el mundo se revele comprensible es un milagro incomprensible. Pero que la comprensión del mundo venga a negar lo que la hace posible, a reducir sus propias

43. Traducción castellana incluida como apéndice al artículo que da título al libro de I. Prigogine: *¿Tan sólo una ilusión?*, Tusquets, Barcelona, 1983.

[7] R. Thom, prefacio al *Essai philosophique sur les probabilités de Laplace*, reeditado en la colección «Epistéme», París, Christian Bourgois, 1986, p. 22.

condiciones a una aproximación práctica, ¡eso ya no es un milagro sino un absurdo!

La tradición que confiere a la física su significación intelectual y afectiva se define por una pregunta apasionada, no por una respuesta. Por esta razón, ella da su sentido a una historia abierta, y no nos encierra en una verdad que no dejaría otra elección que la fidelidad o el abandono. En particular, el ideal de una comprensión del mundo que elimina completamente a quien lo describe, y que mantiene en el corazón de la física la referencia a Dios, único capaz de dar sentido al conocimiento de lo «real en sí», no tiene como alternativa una concepción del saber puramente pragmática. Que nuestro conocimiento no pueda pensarse sin referencia a la relación que mantenemos con el mundo no es en sí mismo sinónimo de límite, de renuncia. Como intentaremos mostrar, puede ser también fuente de nuevas exigencias de coherencia y de pertinencia, apertura a nuevas interrogantes que den un sentido positivo a la multiplicidad de las relaciones que nos sitúan en este mundo.

En particular, a la elección metafísica de afirmar el determinismo no se opone la resignación al indeterminismo sino la elección de hacer frente a la cuestión del tiempo, de crear, con los medios renovados que nos proporciona la ciencia contemporánea, las preguntas y los modos de inteligibilidad que le dan sentido. Y, como veremos, es precisamente integrando en la misma noción de ley científica una condición que nos sitúa, que distingue el tipo de conocimiento que podemos tener de los fenómenos de ese otro conocimiento completamente mítico que remitiría a la figura de un ser infinitamente omnisciente, como la física puede hoy dar sentido a ese tiempo sin el que su existencia sería inconcebible.

Desde este punto de vista es notable que Leibniz, el mismo que descifró en la física de su época el papel fundamental del principio de razón suficiente, y que hizo del determinismo el ideal de una ciencia en la que el saber humano confluiría con el saber divino, haya sido igualmente quien mostró por qué y cómo este ideal podía llegar a ser inaccesible, ilusorio y estéril.

Imaginemos el asno de Buridán frente a dos prados igualmente tentadores. Imaginemos a Adán dudando en comer la manzana prohibida. ¿Podemos predecir qué prado escogerá el asno? ¿Podríamos, conociendo a Adán antes de su pecado,

predecir que cedería a la tentación y desobedecería las órdenes divinas? Y, ¿lo podría el propio Adán, conociéndose tanto como queramos imaginar? No, responde Leibniz[8]. La elección espontánea del asno, el acto libre de Adán, no pueden reducirse a ilusiones. Ciertamente, Dios lo sabe, pero si este saber nos es negado a nosotros no es por motivos contingentes que podrían ser superados por un progreso futuro del conocimiento. No podemos predecir ni la elección del asno ni ia de Adán porque para predecirlas tendríamos que disponer de un conocimiento positivamente infinito. Cualquiera que sea la suma de las informaciones que podamos acumular sobre Adán antes de su elección, desde el momento que estas informaciones siguen siendo finitas, es decir, que pueden expresarse con números o palabras, llegaremos a la definición de un Adán «difuso», compatible con una infinidad de Adanes individuales susceptibles de destinos divergentes, de pecar o de resistir a la tentación.

La libertad leibniziana en el seno de un mundo regido por la razón suficiente no es una ilusión sino una verdad práctica que refleja de manera rigurosa e inevitable la distancia, que sólo Dios puede franquear, entre el ser, que abarca el infinito, y nuestro conocimiento, por naturaleza finito. Si creemos actuar espontáneamente, sin motivo o al margen de cualquier motivo racional, es porque lo que llamamos «motivo» es relativo a nuestro conocimiento, a lo que podemos concebir de manera distinta. Y ningún progreso de este conocimiento podrá vaciar de su sentido la experiencia prática de nuestra libertad, pues incluso si el campo de nuestro conocimiento distinto tendiera hacia el infinito, nunca accedería, al final de la serie, al infinito que implica nuestro ser individual y la más mínima de nuestras acciones.

La afirmación leibniziana de la irreductibilidad práctica de la libertad humana pertenece al campo filosófico. La física contemporánea no puede evidentemente seguir a Leibniz en el plano ético en el que él se sitúa cuando afirma que en un mundo regido por la razón suficiente nosotros podemos vivir libres y dirigirnos a los otros en tanto que seres libres, puesto que nosotros sabemos que ni él ni nosotros podemos predecir cómo estamos

[8] Sobre este tema ver Leibniz, *Essais de Théodicée*, Paris, Garnier-Flammarion, 1969, así como el *Discours de metaphysique* (ed. esp.: *Discurso de metafísica*, Alianza Editorial, 1986) y la *Correspondance avec Arnauld*, Vrin, 1970.

determinados a actuar. En cambio, el camino inventado por Leibniz para crear una articulación inteligible entre la experiencia de la libertad de los hombres (o de la espontaneidad de los animales) y el mundo de la razón suficiente puede hoy ser recorrido de nuevo a propósito de objetos mucho más humildes que pertenecen al campo propio de la física, hasta llegar al problema físico de la irreversibilidad. Si sabemos que ningún conocimiento, por detallado que sea, nos permitirá predecir sobre qué cara caerá un dado, ¿vale más mantener la afirmación de que este dado sigue «a pesar de todo» una ley determinista, o bien intentar formular su descripción de un modo que respeta y hace inteligible el tipo de comportamiento al que debe su existencia en tanto que instrumento de juegos al azar? La tirada del dado rompe entonces, como veremos, la simetría del tiempo y define el futuro común a él mismo y a nosotros que esperamos su resultado.

La andadura de Leibniz explorando las limitaciones a las que está sometido todo conocimiento finito, cualquiera que sea, estuvo guiada por una exigencia de coherencia, por la búsqueda de una articulación entre saberes aparentemente contradictorios. Es también una exigencia de coherencia la que caracteriza el replanteamiento de los interrogantes de la física contemporánea. Esta exigencia tiene sus raíces en la profunda transformación que ha conocido la física en el curso de este siglo y que ha llevado simultáneamente a su eclosión en lenguajes múltiples y al descubrimiento de perspectivas inesperadas que encierran, así nos parece, un nuevo ideal de inteligibilidad. En la historia de esta transformación se distinguen tres períodos.

El primero de estos períodos vio la elaboración de los grandes esquemas conceptuales que hoy prevalecen: relatividad, restringida y general, y mecánica cuántica. Estos esquemas han sido considerados por los físicos como la coronación de la ambición con la que se identifica a la física: descubrir, más allá de los fenómenos, la transparencia de un mundo racional.

Sin embargo, más allá de esta continuidad, conviene notar la aparición de un elemento esencialmente nuevo: la significación que toman las constantes universales, c, velocidad de la luz, y h, constante de Planck. El Universo de Einstein no remite a un punto de vista único. Está poblado de observadores fraternales situados en sistemas de referencia en movimiento unos respecto

a otros; la objetividad sólo puede nacer de una empresa común de intercambio de informaciones. Y este intercambio está sujeto a una restricción: ningún ente físico puede transmitir información a velocidad superior a la de la luz. En cuanto a la constante de Planck, h. que liga los aspectos corpusculares y ondulatorios del ente cuántico, ella nos obliga a renunciar a la mitad de los predicados que permitían definir la partícula clásica. Nadie puede, en el Universo cuántico, atribuir simultáneamente valores bien determinados a dos variables, como posición y velocidad, que eran ambas necesarias para describir objetivamente una partícula clásica.

En este sentido. se puede decir que la formulación del segundo principio de la termodinámica ha jugado un papel de precursor respecto a los grandes esquemas conceptuales de la física del siglo XX. También el segundo principio enuncia una limitación en torno a la que se organiza la termodinámica: los procesos irreversibles escapan al control en cuanto que es imposble invertir su curso y recuperar las diferencias que han sido niveladas. Sin embargo. esta analogía ha quedado disimulada. Mientras que la relatividad y la mecánica cuántica se identifican como los grandes triunfos de la física del siglo XX. el segundo principio queda como sinónimo de impotencia: son nuestros límites los que nos harían incapaces de luchar contra la nivelación progresiva de las diferencias, contra el proceso de degradación que condena todo y lleva a nuestro Universo a la muerte.

Una serie de descubrimientos absolutamente inesperados, y que abren perspectivas insospechadas, marca el origen del segundo período. Uno es ciertamente el de la inestabilidad de las partículas elementales y su complejidad. Lejos de reencontrar, más allá de los fenómenos a nuestra escala, un mundo que escapa al tiempo, es un mundo activo, en cuyo seno continuamente se crean y desaparecen las partículas, el que se ha impuesto para sorpresa de los físicos. Otro descubrimiento inesperado es el del carácter histórico del Universo. El tercero es el descubrimiento de las estructuras de no-equilibrio que invierten el dogma que asimilaba el crecimiento de la entropía con el desorden molecular. Retrospectivamente podemos decir que este segundo período ha visto el descubrimiento de un mundo de procesos, de creación, de destrucción o de evolución, bien

alejado del mundo regido por leyes intemporales que constituía el ideal de la física clásica.

Reunir en una nueva coherencia las perspectivas creadas por la física del siglo XX: he ahí lo que define al que llamaremos el «tercer período» de la física de este siglo, en cuyo umbral nos situamos y al que está dedicado este libro.

Capítulo 3

¿COMO MIRAR AL MUNDO?

Desde la época en que Leibniz y Newton discutían sobre si el movimiento surge o no «de sí mismo», no ha cesado de plantearse una pregunta: ¿se puede *dar cuenta* de la novedad sin reducirla a una simple apariencia?, ¿se puede explicar el cambio sin negarlo, sin reducirlo al encadenamiento de lo mismo a lo mismo? Esta pregunta está hoy más vigente que nunca. En el siglo XIX la vida, las diferentes especies, la existencia de los hombres y de sus sociedades se concibieron como productos de la evolución. En la actualidad, a finales del siglo XX, nada parece que pueda ya escapar en el futuro a este modo de inteligibilidad, ni la materia ni siquiera el espacio-tiempo. No solamente las estrellas, nacen, viven y mueren sino que el propio Universo tiene una historia a la que remiten las partículas elementales que no dejan de crearse, desaparecer y transformarse. Este descubrimiento de la evolución dondequiera que se creían condiciones atemporales hace aún más paradójica la noción clásica de inteligibilidad que todavía hoy domina nuestra concepción de las «leyes de la Naturaleza».

¿Como comprender un suceso, producto de la historia y portador de nuevas posibilidades de historia, como el de la aparición de la vida, si las leyes de la física no permiten dar sentido a la idea de historia? Jacques Monod [1] ha tenido el gran

J. Monod, *Le Hasard et la Nécessité*, París, Seuil, 1970, en especial pp. 160-

mérito de afrontar esta cuestión en toda su crudeza. Para él, la aparición de los seres vivos es un hecho que, por supuesto, no contradice las leyes de la física, pero que estas leyes no pueden hacer inteligible. «Nuestro número ha salido en el juego de MonteCarlo» y, de este suceso único, las leyes de la física sólo pueden afirmar su ínfima, casi nula, probabilidad. Pero el problema va todavía más lejos: la misma existencia de un Universo activo, diferenciado, parece un desafio al segundo principio, identificado con la evolución hacia un estado de equilibrio uniforme e inerte.

«¿Podremos vencer algún día al segundo principio?»: ésta es la pregunta que los hombres plantean de generación en generación, de civilización en civilización, al ordenador gigante imaginado por Isaac Asimov en *The Last Question* [2]. Y el ordenador responde imperturbable: los datos son insuficientes. Transcurren miles de millones de años, las estrellas y las galaxias mueren, pero el ordenador, ahora unido directamente al espacio-tiempo, continúa reuniendo los datos que faltan. Pronto ya no podrá recogerse ninguno más, pues ya «no existe nada» sino el innombrable caos, pero el ordenador continúa calculando, construyendo correlaciones. Y, finalmente, obtiene la respuesta. Ya nadie está allí para escucharla pero el ordenador sabe ahora cómo vencer al segundo principio. Y se hizo la luz...

Al igual que la aparición de la vida para Jacques Monod, el nacimiento mismo del Universo se asimila de este modo a un suceso anti-entrópico, «anti-natural», una victoria del saber sobre las leyes de la Naturaleza.

El relato de Asimov o la lotería cósmica invocada por Jacques Monod pertenecen sin embargo al pasado. Hoy ya no es necesario pensar que los sucesos a los que debemos nuestra existencia se sitúan fuera de las «leyes» de la Naturaleza. Pues estas leyes ya no se oponen a la idea de una verdadera evolución sino que, por el contrario, permiten, como vamos a ver, responder a las *exigencias mínimas necesarias* para pensar una tal evolución.

La primera de estas exigencias, casi una tautología, es

161. Edición española: *El azar y la necesidad*, Barral. Barcelona 1977 y reeditada en Tusquets. Barcelona 1986 y Orbis. Barcelona 1987.

[2] Nueva continuación en *Robot Dreams*, Nueva York, Berkley Books, 1986.

ciertamente la irreversibilidad, *la ruptura de simetría entre el antes y el después.* Pero esto no es suficiente. Un péndulo cuyo movimiento se amortigua poco a poco, la Luna cuyo periodo de rotación sobre su propio eje ha disminuido hasta coincidir con su período de rotación alrededor de la Tierra, o una reacción química que se detiene en el estado de equilibrio, difícilmente pueden pretender ilustrar lo que entendemos por evolución.

Una segunda exigencia es, entonces, la de que podemos dar un sentido a la noción de *suceso.* Un suceso no puede, por definición, ser deducido de una ley determinista: implica, de una u otra manera, que lo que se ha producido «hubiera podido» no producirse y, por ello, remite a posibles que ningún saber puede reducir. El modo de inteligibilidad de los posibles como tales y de los sucesos que deciden entre estos posibles es, por definición, la descripción probabilista. No obstante, las leyes probabilistas, por sí mismas, no son todavía suficientes. Toda historia, toda narración supone sucesos, supone que se ha producido lo que hubiera podido no producirse, pero ella sólo tiene interés si estos sucesos son *portadores de sentido.* No se narra una serie de tiradas de dados, salvo si algunas de estas tiradas tienen consecuencias significativas: el dado sólo es instrumento de un juego de azar si realmente *hay algo en juego.*

Todo el mundo conoce el cuento del clavo que faltaba a la armadura y cuya pérdida inmovilizó al caballero cuya ausencia determinó la derrota en una batalla que provocó la caída de un imperio... Este es un ejemplo caricaturesco del tipo de pregunta que fascina a todo aficionado a la historia y que constituye el tema favorito de los «viajes en el tiempo» imaginados por la ciencia-ficción: ¿qué hubiera pasado si...? Esta pregunta indica siempre un problema de nuestra historia a causa de una modificación en apariencia insignificante? La tercera exigencia mínima es, entonces, que algunos sucesos sean susceptibles de *transformar el sentido* de la evolución que desencadenan, o lo que es lo mismo, y recíprocamente, que esta evolución se caracterice por mecanismos o relaciones susceptibles de dar un sentido al suceso, de generar a partir de él nuevas *coherencias.*

La teoría darwinista ilustra las tres exigencias mínimas que acabamos de plantear: irreversibilidad, suceso, coherencia. La irreversibilidad va implícita puesto que existe en todos los niveles, desde el nacimiento v la muerte de los individuos hasta

la aparición de nuevas especies a las que corresponden nuevos nichos ecológicos que crean nuevas posibilidades de evolución. ¿Qué hay del suceso? El suceso determinante, el que la teoría darwinista debe hacer inteligible, es la aparición de una nueva especie. Pero este mismo suceso remite a una población fluctuante de micro-sucesos: lo que denominamos una especie sólo es homogénea estadísticamente hablando; cada población está constituida por individuos más o menos diferentes unos de otros, y cada nacimiento constituye así un «suceso», la aparición de un nuevo individuo. La creación de una nueva especie significa que entre estos micro-sucesos algunos han adquirido sentido: ciertos individuos se han caracterizado por una tasa de reproducción más alta que los demás y su multiplicación ha transformado progresivamente la identidad de la especie y la relación de los miembros de esta especie con su entorno. De este modo, la selección natural constituye el mecanismo gracias al cual las diferencias, que fluctúan sin cesar, pueden cambiar de escala y generar una verdadera diferencia, la transformación del perfil medio de la población.

Evidentemente, la evolución darwinista constituye sólo un modelo y no la verdad de cualquier historia. Pero toda historia contiene, como el modelo darwinista, la irreversibilidad, el suceso y la posibilidad de que algunos sucesos, en ciertas circunstancias, adquieran una significación y sean punto de partida de nuevas coherencias. Comprender una historia no es reducirla a regularidades subyacentes ni a un caos de sucesos arbitrarios; es comprender a la vez coherencias y sucesos: las coherencias en tanto que pueden resistir a los sucesos y condenarlos a la insignificancia o, por el contrario, ser destruidas o transformadas por algunos de ellos; los sucesos en tanto que pueden o no hacer surgir nuevas posibilidades de historia.

Es evidente que la termodinámica definida en el siglo siglo XIX en torno a la noción de evolución irreversible hacia el equilibrio no satisface estas exigencias. El único suceso al que puede dar sentido es la preparación inicial de un sistema lejos del equilibrio, y lo que ella describe es el modo como este suceso se hace insignificante: el sistema olvida la particularidad de su origen para evolucionar hacia une estado que se puede describir mediante unas pocas variables solamente.

¿Cómo explicar el cambio de significación que ha conocido la noción de irreversbilidad en los últimos veinte años? ¿Cómo es posible que el segundo principio haya dejado de identificarse con la desaparición de toda actividad, de toda diferencia, y pueda participar hoy en la comprensión de un mundo intrínsecamente evolutivo?

El segundo principio, tal como fue enunciado por Clausius, tenía precisamente por objeto lo que podemos llamar la actividad físico-química de la materia. La reacciones químicas, los fenómenos de transporte, de difusión o de propagación, que corresponden a evoluciones con entropía creciente, no pueden ser idealizados como procesos reversibles, al contrario que el movimiento del péndulo, por ejemplo. Toda reacción química marca una diferencia entre el pasado y el futuro, se produce en la dirección de nuestro futuro. Análogamente, es en la dirección de nuestro futuro, y no de nuestro pasado, en la que el calor se difunde de un punto más caliente a otro más frío. Sin embargo, el segundo principio, en el sentido de Clausius, definía esta actividad desde un punto de vista muy particular: aquél según el cual, en ciertas condiciones, ella lleva inevitablemente a su propia desaparición, es decir, al estado de equilibrio.

¿Cómo considerar de manera más general la actividad fisicoquímica productora de entropía?

El estado de equilibrio puede definirse como un caso particular de *estado estacionario*, es decir, de estado cuya entropía no varía en el curso del tiempo. Cualquier variación de entropía en el seno de un sistema termodinámico puede descomponerse en dos tipos de contribución: el *aporte* «externo» de entropía, que mide los intercambios con el medio y cuyo signo depende de la naturaleza de estos intercambios, y la *producción* de entropía, que mide los procesos irreversibles en el seno del sistema. Esta producción de entropía es la que el segundo principio define como positiva o nula. En el estado estacionario, por definición, la producción de entropía está permanentemente compensada por el aporte de entropía ligado a los intercambios con el medio: el sistema es sede de una permanente actividad, productora de entropía, que se mantiene al precio de continuos intercambios con el medio. El estado de equilibrio corresponde al caso particular en que los intercambios con el medio no hacen variar

la entropía y, por consiguiente, la producción de entropía es también nula.

El estado estacionario permite asi caracterizar la actividad productora de entropía en tanto que tal. y no desde la única perspectiva de su desaparición en el equilibrio. El estadio de los estados estacionarios basta para disociar el segundo principio de la idea de evolución hacia el «desorden». la inercia. la uniformidad. Consideremos un experimento de termodifusión (*fig.l*). Tenemos dos recipientes unidos por un canal y llenos de una mezcla de dos gases, por ejemplo, hidrógeno y nitrógeno. Partimos de una situación de equilibrio: los dos recipientes están a la misma temperatura y presión, y contienen la misma mezcla homogénea de los dos gases. Establezcamos ahora una diferencia de temperatura entre los dos recipientes. La desviación respecto al equilibrio que supone esta diferencia de temperatura sólo puede ser mantenida si es alimentada por un flujo de calor que compense los efectos de la difusión térmica: un recipiente está permanentemente calentado mientras que el otro está enfriado. Ahora bien, el experimento muestra que, acoplado al proceso de difusión de calor, se produce un proceso de *separa-*

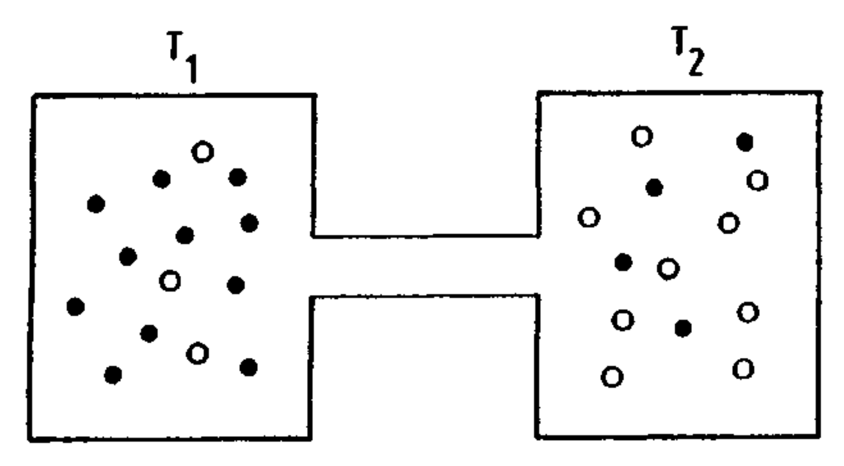


Figura 1.- *Cuando se establece una diferencia de temperatura entre los dos recipientes, la mezcla contiene más moléculas «blancas» en el recipiente de la derecha y más moléculas «negras» en el de la izquierda. La diferencia de concentración es proporcional a la diferencia de temperatura.*

ción de ambos gases. Cuando el sistema haya alcanzado su estado estacionario tal que, para un flujo de calor dado, la diferencia de temperatura ya no varía en el curso del tiempo, habrá más hidrógeno, pongamos por caso, en el recipiente caliente, y más nitrógeno en el recipiente frío, siendo la diferencia de concentración proporcional a la diferencia de temperatura.

Vemos entonces que, en este caso, la actividad productora de entropía ya no puede ser asimilada a una simple nivelación de las diferencias. Ciertamente el flujo térmico juega este papel, pero el proceso de separación de los gases mezclados que se produce por acoplamiento con la difusión es un proceso de creación de diferencia, un proceso de «anti-difusión» que aporta una contribución *negativa* a la producción de entropía.

Este sencillo ejemplo muestra hasta qué punto nos es necesario liberarnos de la idea de que la actividad productora de entropía es sinónimo de degradación, de nivelación de diferencias. Pues si bien es cierto que debemos pagar un precio entrópico por mantener en su estado estacionario al proceso de termodifusión, también es cierto que este estado corresponde a una creación de orden. Un nueva mirada se hace así posible: podemos ver el «desorden» producido por el mantenimiento del estado estacionario como lo que nos permite crear un orden, una diferencia de composición química entre los dos recipientes. El orden y el desorden se presentan aquí no como opuestos uno a otro sino como indisociables.

¿A qué llamamos orden? ¿A qué llamamos desorden? Todos sabemos que las definiciones varían y con frecuencia reflejan juicios sobre la belleza, la utilidad, los valores. Sin embargo, estos juicios también se enriquecen con lo que aprendemos. Durante mucho tiempo la turbulencia se nos imponía como el ejemplo por excelencia del desorden. Por el contrario, el cristal aparecía como la figura del orden. Como veremos a continuación, en adelante estamos en condiciones de modificar estos juicios.

• Hoy sabemos que debemos entender el régimen turbulento como «ordenado»: los movimientos de dos moléculas situadas a distancias macroscópicas, que se miden en centímetros, están de hecho correlacionados. Por el contrario, los átomos que forman un cristal vibran en torno a su posición de equilibrio de forma

incoherente: el cristal está desordenado desde el punto de vista de sus modos de excitación.

El ejemplo de la termodifusión plantea el problema del «precio» de la creación de orden. La separación química de los dos gases no es una criba que opera para siempre sino un proceso que tiene como precio una permanente creación de «desorden», la nivelación de la diferencia de temperatuas que mantiene ei flujo de calor. Volvemos a encontrar una articulación semejante en el metabolismo de los seres vivos en donde la construcción de moléculas biológicas complejas va acompañada de la destrucción de otras moléculas, bien entendido que la suma de los procesos corresponde a una producción de entropía positiva. Pero, ¿podemos prolongar esta idea más allá de donde la termodinámica puede guiarnos, allí donde se trata fundamentalmente de las relaciones de los hombres entre sí y con la Naturaleza? La intensificación de las relaciones sociales que favorece la vida urbana, por ejemplo, ¿no ha sido a la vez fuente de deshechos, de polución, y de invenciones prácticas, artísticas e intelectuales? La analogía es fecunda en cuanto que articula lo que con frecuencia estamos tentados a oponer, pero ella no fundamenta, obligado es decirlo, ningún juicio sobre los valores respectivos de lo que se crea y se destruye ni, lo que es más importante, legitima nuestra historia como necesaria u óptima. El ejemplo de la física puede esclarecer el problema planteado a los hombres, no resolverlo.

Como veremos en el capítulo 7 de este ensayo, la dualidad, creadora y destructora, de los procesos irreversibles puede esclarecer del mismo modo la cuestión del origen del Universo. En el seno de este Universo, por cada «barión», o partícula «pesada», existen alrededor de 10^{10} fotones. Los escasos bariones y estos numerosos fotones, que constituyen la famosa «radiación cósmica de fondo», son los productos de un suceso único durante el cual se crearon simultáneamente. ¿Corno no ver en ello una preciosa indicación? La muerte térmica, lejos de pertenecer a nuestro futuro, ¿no se remontaría a nuestros orígenes? Los bariones, estructuras complejas y ordenadas, ¿no deberán su existencia a una formidable explosión entrópica de la que los fotones, productos residuales inertes, nos permiten medir el coste?

Volvamos a la físico-química. El fenómeno de termodifusión

es un fenómeno continuo: la separación de los dos gases es proporcional a la diferencia de temperatura. Pero en otros casos tenemos que tratar con fenómenos bruscos, espectaculares: con la aparición de nuevos regímenes de funcionamiento, cualitativamente diferentes, que aparecen a una determinada distancia del equilibrio, es decir, a partir de un umbral de intensidad de los procesos irreversibles que tienen lugar en el sistema.

No nos detendremos aqui en el descubrimiento de las estructuras disipativas, que ha sido expuesto con detalle en *La nueva alianza*. Tomemos, por poner de manifiesto la sorpresa que supusieron, el conocido ejemplo de la «inestabilidad de Bénard». Una capa líquida delgada está sometida a una diferencia de temperatura entre la superficie interior, permanentemente calentada, y la superficie superior, en contacto con el medio ambiente externo. Para un determinado valor de la diferencia de temperatura, el transporte de calor por conducción, en el que el calor se transmite por colisiones entre las moléculas, se refuerza con un transporte por convección, en el que las propias moléculas participan de un movimiento colectivo. Se forman entonces vórtices que distribuyen la capa líquida en «celdas» regulares.

La aparición de ios vórtices de Bénard manifiesta una ruptura de simetría espacial. Antes de alcanzar el umbral de inestabilidad, cada región del sistema estaba en el mismo estado promedio. A partir de la inestabilidad de Bénard ya no sucede lo mismo: en un punto dado las moléculas suben, en otro bajan. ¿Cómo es esto posible? ¿Cómo pueden las moléculas, que en número inmenso constituyen la capa líquida, abandonar el movimiento incoherente que tenían? ¿Cómo esta multitud innumerable y caótica puede adoptar un comportamiento coherente, diferenciado en cada región?

Lejos del equilibrio conviene hablar de nuevos estados de la materia, de estados que se oponen al conjunto de estados de equilibrio. En efecto, ya se hable de estados de equilibrio gaseoso, líquido o cristalino, importa poco aquí: todos tienen en común un rasgo esencial que les distingue de las situaciones de no-equilibrio que ilustran los vórtices de Bénard o la turbulencia. Los nuevos estados de no-equilibrio de la materia se caracterizan por la aparición de *correlaciones de largo alcance*. La enorme diferencia de escala entre las correlaciones de alcance del amstrong (10^{-8} cm), que caracterizan los estados de equili-

brio, y las correlaciones sobre distancias macroscópicas, por ejemplo del orden del centímetro, que aparecen lejos del equilibrio, expresa la diferencia entre el equilibrio y el no-equilibrio.

¿Qué es una correlación? Mientras que la definición de las interacciones, es decir, de las relaciones efectivas entre constituyentes, forma parte de la misma definición de un sistema y, por lo tanto, precede en este sentido al estudio de sus diferentes regímenes de actividad, las correlaciones se definen con respecto entre el «todo» y las «partes» que caracteriza a cada uno de ellos. Las partes en cuestión pueden ser simplemente las diferentes regiones del sistema, y entonces nos preguntaremos cómo un determinado suceso local afecta a su entorno, sobre qué alcance y en qué medida. Pero también pueden ser más abstractas. Por ejemplo, el cristal puede caracterizarse en términos de sus modos colectivos de excitación (los fonones).

Los estados de equilibrio se caracterizan por el hecho de que siempre existe una representación, una elección de unidades (los modos de excitación para el cristal, las moléculas para el gas) tal que el comportamiento de estas unidades sea incoherente.

Un medio lejos del equilibrio, como el que es sede de los vórtices de Bénard, se caracteriza en cambio por correlaciones intrínsecas de largo alcance. Los vórtices son un ejemplo de la coherencia que reflejan estas correlaciones: las moléculas atrapadas en un vórtice ya no pueden ser definidas como unidades independientes unas de otras.

Un experimento reciente de simulación numérica con ordenador ha permitido visualizar por primera vez el nacimiento de vórtices de este tipo [3]. La simulación considera 5.040 discos duros capaces de moverse y de colisionar en un medio de dos dimensiones. Dos «extremos» opuestos de la caja se mantienen a temperaturas diferentes (una molécula que incide sobre uno de estos extremos lo abandona con una nueva velocidad determinada a partir de la distribución de velocidades características de la «temperatura» de este extremo). Además, los discos están sometidos a una fuerza externa constante en la dirección opuesta al gradiente térmico, que representa a la fuerza de gravitación.

[3] M. Mareschal y E. Kestemont, «Experimental Evidence for Convective Rolls in Finite Two-Dimensional Molecular Models», en *Journal of Statistical Physics*, vol. 48, 1987, p. 1187.

Inicialmente la posición de las moléculas es aleatoria y su distribución de velocidades responde a la distribución de equilibrio correspondiente a la temperatura local (*fig.2-A*).

La simulación permite «ver» lo que significa la aparición de correlaciones de largo alcance: el nacimiento de un comportamiento macroscópico nuevo que no está originado por nuevas interacciones elementales sino que se refiere a la población como tal, a lo que estas unidades elementales hacen «en conjunto». Cuando la diferencia de temperatura es inferior a la temperatura crítica (*fig. 2-B*) vemos formarse pequeños vórtices que subsisten durante algún tiempo para acabar deshaciéndose finalmente. En cambio, en las condiciones correspondientes al punto crítico (*fig.2-C*), los vórtices que han aparecido tras algunos miles de colisiones ya no se deshacen sino que se hacen cada vez más pronunciados, «reclutan» un número cada vez mayor de «moléculas» hasta organizar la totalidad del medio.

La simulación «muestra» así la competición entre la agitación térmica de las moléculas y la ligadura impuesta al sistema. En cuanto se impone una diferencia de temperatura, ésta origina la aparición de vórtices, pero por debajo del umbral crítico éstos son temporales y acaban por ser destruidos por la agitación térmica. Por el contrario, por encima del umbral se encuentran estabilizados.

Es difícil, sin fórmulas matemáticas, explicar en términos moleculares lo que significa la aparición de correlaciones de largo alcance en el caso de estos vórtices. En cambio, en el caso de los sistemas químicos lejos del equilibrio la situación es más intuitiva[4]. En este caso, la ligadura global afecta a la composición química del sistema o, más exactamente, a la desviación de esta composición respecto a la que corresponde al equilibrio. Podemos considerar cada una de las colisiones reactivas como un «suceso» raro en comparación con las colisiones «brownianas» que se producen incesantemente, y tratar de caracterizarla desde el punto de vista de sus consecuencias. Cada colisión reactiva tiene como consecuencia una variación local de las concentraciones químicas, crea una diferencia. Así, si una molé-

[4] Véase M. Malek Mansour y C. van den Broeck, «Inhomogeneous Fluctuations in Reaction-Diffusión Systems», en *Instabilities, Bifurcations and Fluctuations in Chemical Systems*, L. E. Reichl ed. en W. C. Schieve, Austin, University of Texas Press, 1982.

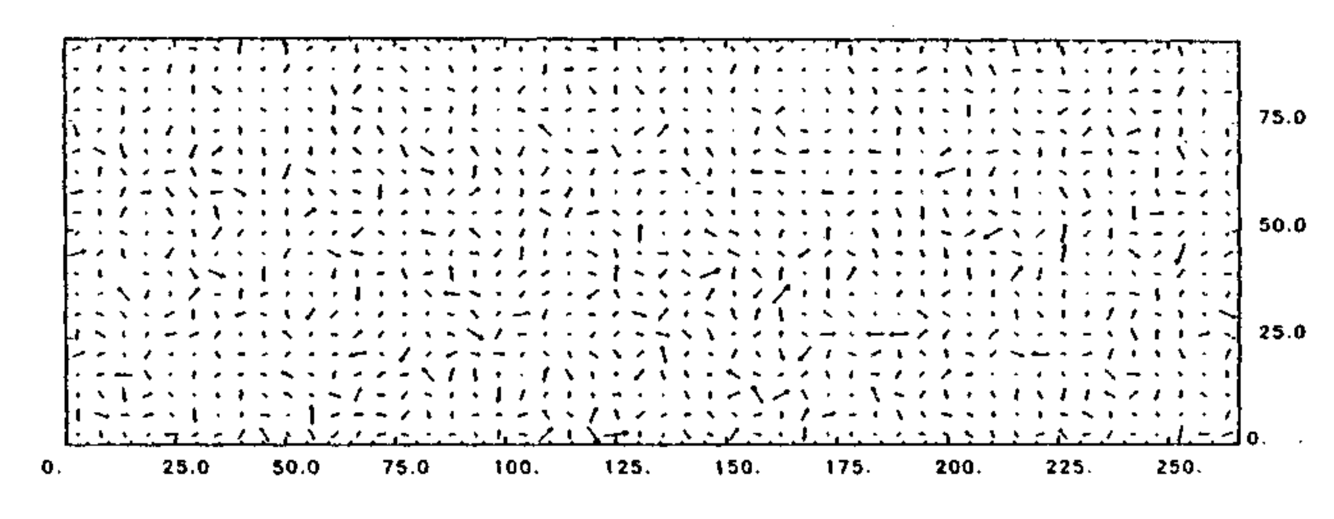


Figura 2-A. – *Estado del sistema después de un tiempo de evolución igual al tiempo medio de colisión. Cada flecha indica la velocidad media de las esferas en una de las 1.000 «cajas» en que se divide el espacio. La distribución de velocidades es localmente aleatoria.*

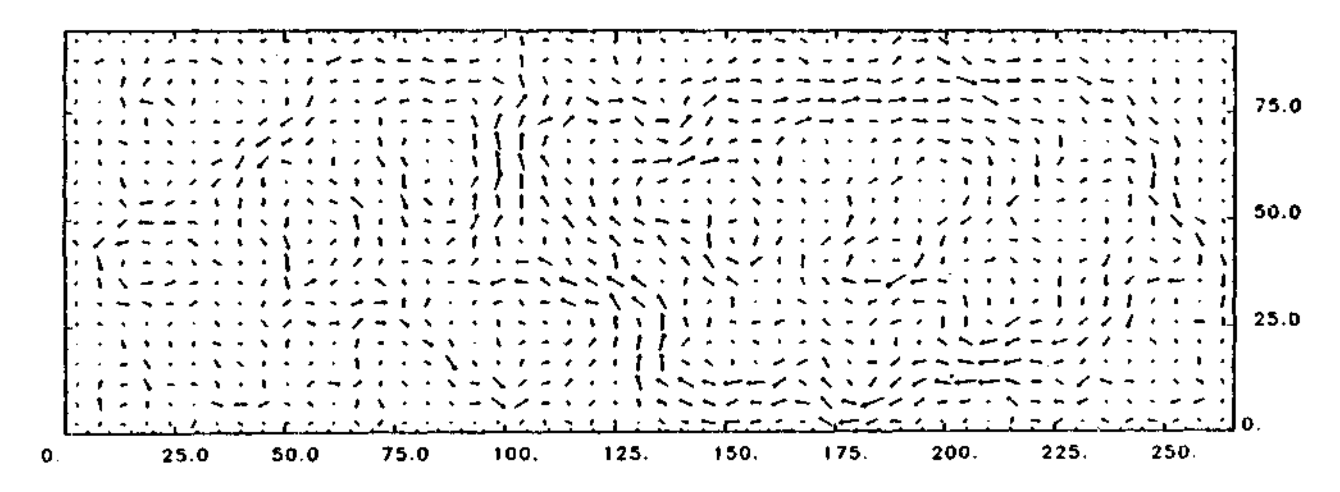


Figura 2-B. *Distribución de las velocidades medias después de 12 millones de colisiones en condiciones que simulan una diferencia de temperatura inferior a la diferencia crítica. Los vórtices están presentes pero no forman estructuras macroscópicas estables.*

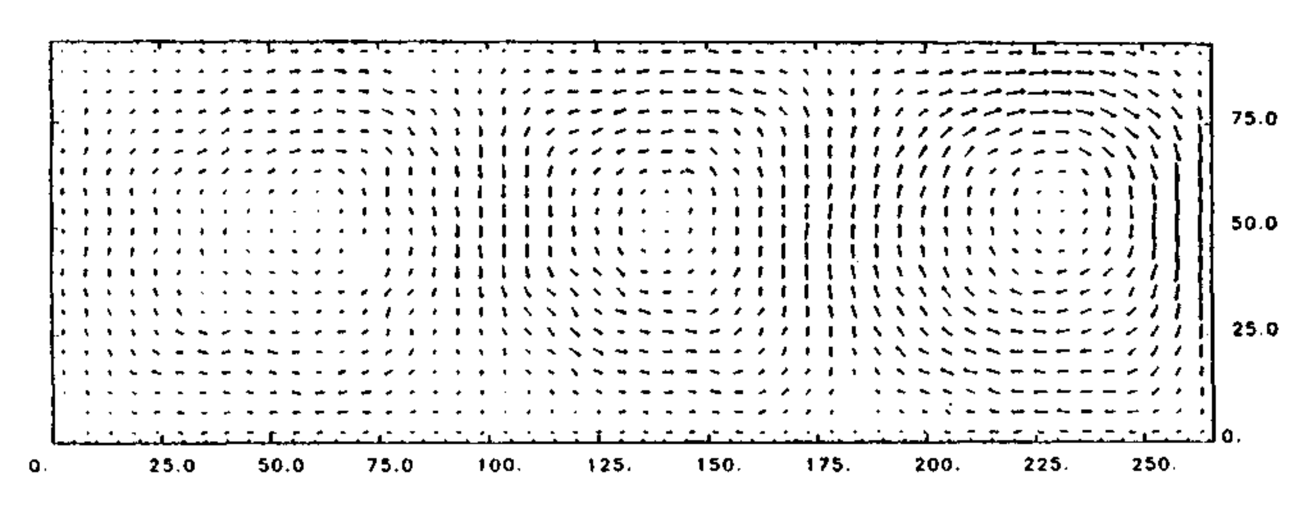


Figura 2-C. *Distribución de las velocidades medias después de 12 millones de colisiones para una diferencia de temperatura superior a la crítica.*

cula A da dos moléculas X, este suceso tiene como consecuencia local la existencia de «más» moléculas X en esta micro-región. Toda la cuestión consiste entonces en saber si esta diferencia se diluirá, compensada inmediatamente por la reacción inversa, como es el caso en el estado de equilibrio químico, o si podrá desencadenar un efecto.

Tomemos el caso en que los flujos que apartan el sistema del equilibrio dan lugar a un dominio de la reacción «A da 2X» sobre su inversa. A cada reacción que produce 2 moléculas de X en la misma región del sistema, éstas se encontrarán más próximas entre sí de lo que supondría la distribución media. Por el contrario, cuando domina la reacción inversa las moléculas X estarán más alejadas unas de otras que en la distribución «desordenada»: todas las moléculas próximas tienen de hecho probabilidades de encontrarse y desaparecer. Todo sucede entonces «como si» en un caso las moléculas X se atrajeran y, en el otro, se repelieran (*fig. 3*).

Así pues, cualquier mecanismo de reacción química no lineal (del tipo $A \rightleftarrows 2X$) da lugar, fuera del equilibrio, a la aparición de correlaciones. Pero para que estas correlaciones tengan consecuencias espectaculares son necesarias condiciones más fuertes, a saber, la existencia de reacciones *catalíticas* («autocatálisis»

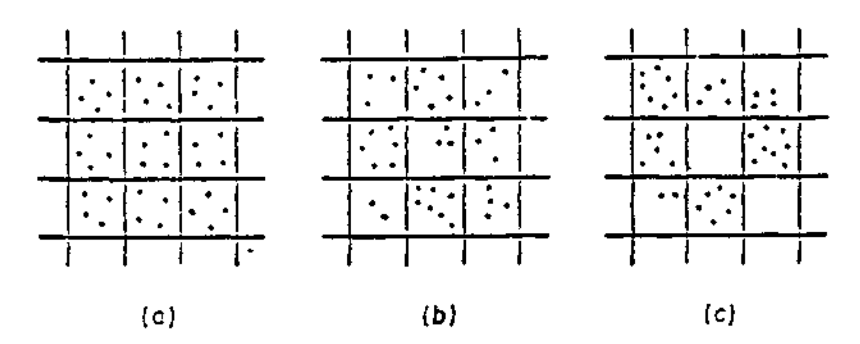


Figura 3.—*Cuando domina la reacción $2X \rightarrow A$ todo ocurre como si existiera una interacción repulsiva entre las moléculas X (3-a). Cuando se equilibran las dos reacciones tenemos una distribución de Poisson (3-b). Cuando domina la reacción $A \rightarrow 2X$ todo ocurre como si existiera una atracción entre las Z (3-c).*

del tipo $A + 2X \rightarrow 3X$, «catálisis cruzada» del tipo $A + X \rightarrow 2Y$; $B + Y \rightarrow 2X$). El estado estacionario puede entonces hacerse inestable a una determinada distancia del equilibrio y el sistema puede adoptar un régimen estructurado de actividad (tipo reloj químico, por ejemplo). En tal régimen el sistema constituye un «todo» del que cada parte es «sensible» a todas las demás.

De este modo, lejos del equilibrio los procesos irreversibles son fuente de *coherencia.* L'a aparición de esta actividad coherente de la materia —las «estructuras disipativas»— nos impone una nueva forma de mirar, una nueva manera de situarnos respecto al sistema que definimos y manipulamos. Mientras que en el equilibrio y cerca del equilibrio el comportamiento del sistema está, para tiempos suficientemente largos, enteramente determinado por las condiciones de contorno, en lo sucesivo deberemos reconocerles una cierta autonomía que permite hablar de las estructuras lejos del equilibrio como de fenómenos de «autoorganización».

Tomemos primeramente un término como el de «ligadura». El flujo del calor y de materia que mantiene la desviación respecto al equilibrio es una «ligadura» en cuanto que, sin él, el sistema evolucionaría hacia el equilibrio. Cerca del equilibrio esta ligadura que nosotros imponemos basta para determinar la actividad del sistema: el estado estacionario corresponde en efecto a la actividad mínima compatible con la ligadura que mantiene al sistema fuera del equilibrio (éste es el teorema de mínima producción de entropía formulado por uno de nosotros en 1945). Podemos decir entonces, para un proceso como la termodifusión por ejemplo, que la diferencia térmica impuesta al sistema «explica» la actividad de éste. No sucede lo mismo más allá del umbral de inestabilidad. Así, los vórtices de Bénard son más costosos en entropía que el estado estacionario, ahora inestable, que correspondería a la misma diferencia de temperatura: el calor es transportado más rápidamente desde la superficie inferior hacia la superficie superior, y es necesario entonces alimentar el sistema con un flujo de calor más intenso para mantener esta misma diferencia de temperatura. En este caso es difícil decir que la ligadura de no-equilibrio impone al sistema su actividad. Esta se organiza espontáneamente *a partir de* esta ligadura.

La modificación de la relación entre la actividad del sistema y las condiciones que la determinan va más lejos. Vamos a mostrar cómo, a partir de las nociones de *sensibilidad,* de *inestabilidad* y de *bifurcación,* ella abre la física al problema de la evolución.

Para introducir la noción de sensibilidad tomemos un primer ejemplo que nos llevará de nuevo a los vórtices de Bénard [5]. Mientras que en un sistema en el equilibrio el efecto de la gravitación sobre una capa de líquido es completamente insignificante, ella juega un papel crucial en un fenómeno de inestabilidad como el de Bénard. En efecto, los vórtices de Bénard reflejan de alguna manera la «contradicción» entre la gravitación y el gradiente de temperatura: éste implica una menor densidad en la parte más baja, es decir más caliente, de la capa líquida, mientras que la gravitación implica un reparto inverso de la densidad.

Un sistema físico-químico puede así hacerse sensible, lejos del equilibrio, a factores despreciables cerca del equilibrio. Utilizar en este contexto un término como el de «sensibilidad» no supone proyección antropomórfica sino que significa un *enriquecimiento de la noción de causalidad.* Los sistemas alejados del equilibrio no sufren la fuerza de gravitación a la manera de un cuerpo pesante; su comportamiento no está sometido a una relación *general* de causa a efecto. La relación causal es aquí recíproca: es la actividad del sistema la que «da sentido» a la gravitación, la que la integra de manera específica en su propio régimen de funcionamiento, y la gravedad hace entonces a este sistema capaz de nuevas estructuras, de nuevas diferenciaciones.

La noción de «sensibilidad» une lo que los físicos tenían costumbre de separar, la definición del sistema y su actividad. Para definir un sistema en el equilibrio podemos despreciar el hecho de que se encuentra en el campo gravitatorio terrestre, pero esta aproximación ya no es posible lejos del equilibrio. Es entonces la actividad del sistema la que obliga a transformar su definición. Desde este momento ya no se puede hablar, como era el caso en el equilibrio, de un sistema «manipulable», totalmente determinado por sus «condiciones de contorno», es decir, por las

[5] S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stabylity,* Oxford University Press, 1961. Véase también D. Kondepudi y G. Nelson, en *Nature,* vol. 314, 1985, p. 438.

relaciones que mantiene con su medio y que nosotros podemos manipular a voluntad. Es la actividad intrínseca del sistema la que determina cómo debemos describir su relación con el entorno, la que genera así el tipo de inteligibilidad que será pertinente para comprender sus historias posibles.

Volvamos a encontrar la noción de sensibilidad asociada a la de *inestabilidad,* puesto que en este caso se trata de la sensibilidad del sistema hacia sí mismo, a las fluctuaciones de su propia actividad. También aquí es de la actividad del sistema de la que depende nuestro modo de representación. Podemos describir un sistema en el equilibrio solamente con los valores medios de la magnitudes que lo caracterizan, porque el estado de equilibrio es estable respecto a las incesantes fluctuaciones que perturban estos valores, porqué estas fluctuaciones están condenadas a la regresión. Por esta razón podemos igualmente definir estos sistemas como controlables: en un sistema físico-químico el valor medio del flujo de energía o de materia y el conjunto de condiciones de contorno dependen de la elección del experimentador pero no el hecho de que en un instante dado tenga lugar una colisión reactiva o que se forme un pequeño vórtice en una delgada capa de líquido.

La representación que construimos a propósito de un sistema remite de este modo a nuestras posibilidades de manipulación, pero su pertinencia es relativa a la estabilidad del sistema respecto a lo que no podemos manipular, al hecho de que los sucesos incontrolables queden o no insignificantes. El hecho de que tal o cual suceso pueda «tomar sentido», dejar de ser un simple ruido en el tumulto sin sentido de la actividad microscópica, introduce en física este elemento narrativo que hemos dicho que era indispensable para una verdadera concepción de la evolución. Y la historia de la vida puede leerse, sin duda, al menos en parte, como la historia de una multiplicación de la «sensibilidad», como la incorporación por el organismo viviente *activo* de débiles interacciones que se convierten en otras tantas *informaciones* que tejen sus relaciones con su mundo...

Volvamos al problema de la inestabilidad. ¿Qué pasaría si...? ¿Qué hubiera pasado si...? No son solamente preguntas de historiador sino también de físico que se enfrenta a un sistema que no puede ya ser representado como manipulable y controlable. Estas preguntas no remiten a una ignorancia contingente y

superable sino que definen la singularidad de los *puntos de bifurcación.* En estos puntos el comportamiento del sistema se hace inestable y puede evolucionar hacia varios regímenes de funcionamiento estables. En tales puntos, un «mejor conocimiento» no nos permitiría deducir lo que sucederá ni sustituir las probabilidades por certezas.

El estudio del punto de bifurcación más sencillo, aquél en el que un estado se hace inestable mientras emergen simétricamente otros dos posibles estados estables. basta para mostrar el carácter irreductible de la situación probabilista: existe una posibilidad sobre dos de encontrar el sistema, después del punto de bifurcación, en uno u otro de los regímenes de actividad posibles. Es posible, desde luego, romper la simetría de los dos regímenes. Así, en ciertos casos el campo gravitatorio basta para determinar una elección privilegiada y restablecer de este modo una posibilidad de predicción cuasi-determinista *(fig.4).* Sin embargo, el fenómeno sigue siendo especialmente aleatorio en la medida en que lo que permite vencer el azar no es una mejora de nuestro conocimiento de los mecanismos de interacción, de las condiciones iniciales, de todas las particularidades del sistema, sino una modificación de la estructura del diagrama de bifurcación. Es pues este diagrama, representación de la coexistencia y de la articulación de los posibles, el que determina en cada caso lo que podrá ser predicho y aquello otro de lo que podemos saber a priori que solamente podremos constatarlo y contarlo.

La teoría de bifurcaciones está actualmente en pleno crecimiento y a ella están asociados muchos nombres, sobre todo el de René Thom cuya teoría de catástrofes constituyó una primera clasificación importante de los tipos de bifurcación posibles. Sabemos hoy que un mismo sistema puede, a medida que se hace crecer su distancia al equilibrio, atravesar múltiples zonas de inestabilidad *(fig. 5)* en las que su comportamiento se transformará de manera cualitativa. Podrá, en particular, alcanzar un régimen caótico en el que su actividad puede definirse como lo contrario del desorden indiferente que reina en el equilibrio: ninguna estabilidad asegura ya la pertinencia de una descripción macroscópica, todos los posibles se actualizan, coexisten e interfieren, el sistema es «al mismo tiempo» todo lo que puede ser.

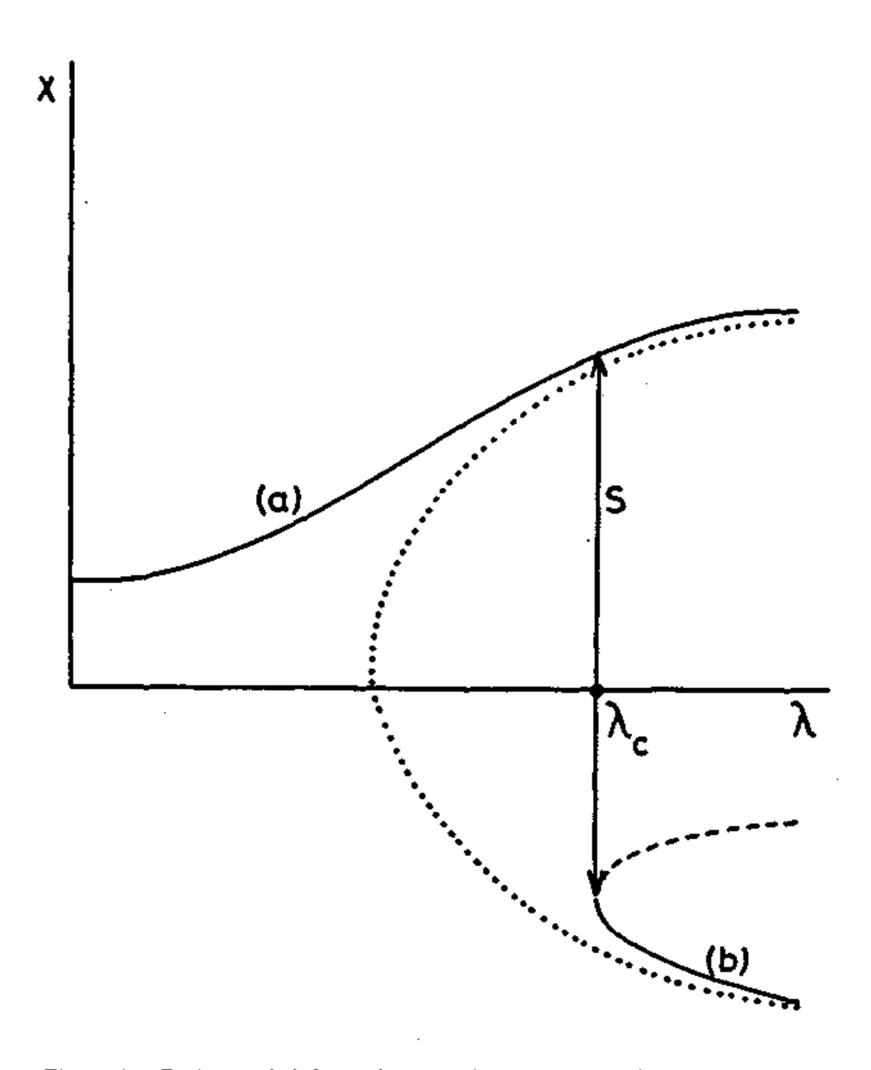


Figura 4.—*Fenómeno de bifurcación «asistida» en presencia de un campo externo (gravitatorio, por ejemplo). La concentración X, que caracteriza el régimen de actividad del sistema, se representa en función del parámetro λ que mide la desviación respecto al equilibrio. La línea de puntos representa la bifurcación simétrica entre los regímenes (a) y (b) que existiría en ausencia de campo. En presencia de este último, el régimen (a) emerge de forma continua mientras que el régimen (b) sólo puede ser alcanzado por una perturbación finita a partir de $\lambda = \lambda_c$.*

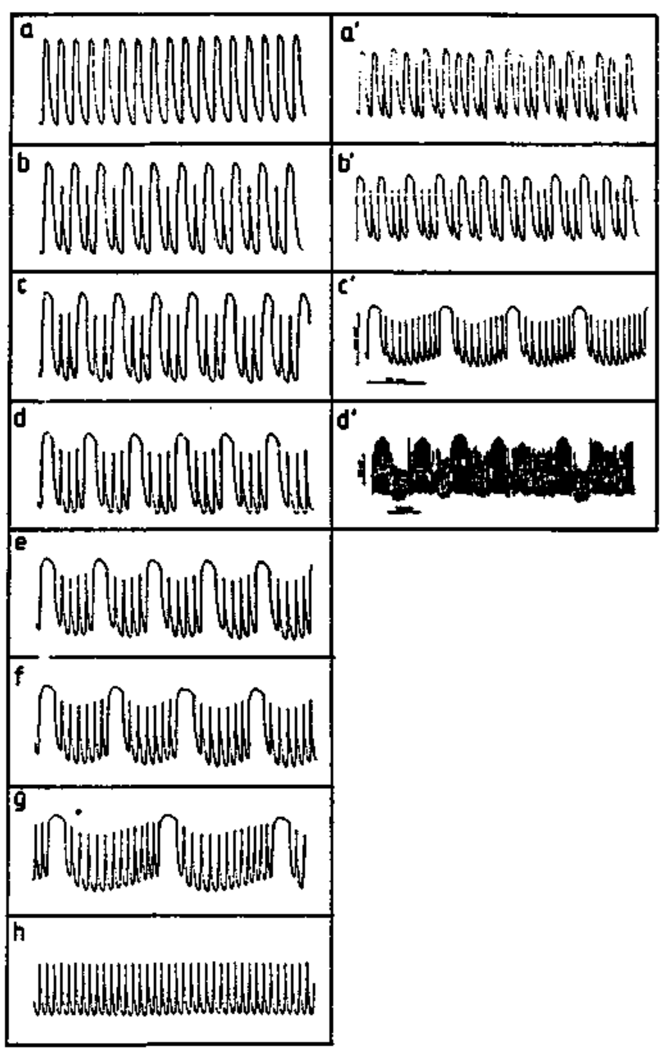


Figura 5.—*Variación temporal del «potencial de electrodo» (que mide el estado químico del medio reactivo) para la reacción «clorita-tiosulfato»*[6]. *Para la misma reacción química, a temperaturas y condiciones de flujo diferentes, el sistema puede experimentar (de a a h) oscilaciones periódicas complejas y finalmente una oscilación de relajación (5-h), o bien (de a' a d') oscilaciones aperiódicas (caóticas).*

[6] Figuras construidas a partir de las obtenidas por I. R. Epstein (en *Chemical Instabilities*, ed. G. Nicolis y F. Baras, Dordrecht, D. Reidel Pub. Comp., 1983).

Acabamos de esbozar la descripción de las nuevas nociones que articula la física lejos del equilibrio y la nueva mirada que los físicos, en el curso de los últimos años, han aprendido a lanzar sobre el mundo de los procesos físico-químicos. Ya en *La nueva alianza* habíamos afirmado que esta nueva mirada constituye la promesa de una renovación de la coherencia cultural que los ideales del conocimiento con que se identifica a la física clásica había contribuido a destruir. ¿Cómo concebir esta promesa? No, ciertamente, como una vuelta atrás hacia una concepción unificada y tranquilizadora que sustituiría el cosmos estático de los griegos por un «cosmos evolutivo» igualmente transparente a la inteligencia humana. Por eso hemos caracterizado la noción de evolución no en términos de «conceptos» que deberían *responder* a nuestras preguntas, sino en términos de exigencias mínimas sin las cuales el *problema* no puede ser planteado.

Hemos mostrado cómo la física podía en lo sucesivo cumplir estas exigencias mínimas. Sin embargo, ella no constituye *la* ciencia modelo, en el sentido de que los conceptos creados por los físicos podrían «aplicarse» a otras ciencias o encontrar su equivalente en ellas. Muy al contrario, la transformación de la física rompe la noción de «ciencia modelo».

Esta noción de ciencia modelo estaba ligada a lo que constituía el título de gloria de la física clásica: el descubrimiento, más allá del cambio, de leyes invariantes. Cualquier ciencia era entonces juzgada por comparación con este ideal, instada a pensarse como «precientífica», todavía sometida a lo anecdótico, a la apariencia, o a vincularse a un contramodelo que afirma, por ejemplo, frente a la objetividad científica, la intencionalidad o los valores que son propios del tema. Hoy día los físicos son inducidos a transformar el ideal que las guiaba, es decir, a situarlo y utilizarlo como un instrumento del que hay que comprender sus límites. Comprender significa tanto comprender por qué es estable el estado de equilibrio, y por qué permite definir un sistema como sujeto a quien lo manipula, como comprender por qué, lejos del equilibrio, esta definición del objeto físico-químico debe ser abandonada mientras que nuevos conceptos —los de correlación, inestabilidad, sensibilidad, bifurcación— se hacen pertinentes. Lejos de proponer a las otras ciencias una visión única, el físico descubre en su propio dominio un realidad múltiple a la que no puede dar sentido sin reconocer,

al mismo tiempo, la diversidad irreductible de los problemas que se plantean a las otras ciencias.

Tomemos por ejemplo una noción como la de sensibilidad. Como hemos visto, ella implica que la definición de las relaciones de un sistema con su entorno es relativa al régimen de actividad del sistema. ¿A qué es sensible un ser? ¿Qué puede afectarlo? ¿De qué le hacen capaz sus relaciones con el mundo? Semejantes preguntas tienen ya sentido para «seres» tan simples como los sistemas físico-químicos. Pero, ¿cómo no iban a plantearse con más urgencia a quienes estudian los seres vivos dotados de memoria, capaces de aprender y de interpretar? ¿Cómo no encontrarían un sentido todavía más radical cuando se trata de hombres a los que el lenguaje hace sensibles a la multiplicidad indefinida de sus pasados, de los futuros que pueden temer o esperar, de las lecturas divergentes que brotan del presente? ¿No son las mismas ciencias uno de los vectores de esta sensibilidad? Para los hombres de hoy, el «Big Bang» y la evolución del Universo forman parte del mundo con el mismo título que ayer lo hacían los mitos de la creación. ¿Cómo juzgar a priori qué «es» el hombre, cuáles son los conceptos pertinentes para definir su identidad, si ya la identidad de un sistema físico-químico es relativa a su actividad?

Análogamente, la cuestión del suceso, de las circunstancias que le permiten propagarse, tomar sentido, ser ocasión de transformación cualitativa, es común a todas las ciencias que tratan con poblaciones, con modos de ser «de conjunto». Sorprende constatar que las teorías sociales y políticas, pero también los revolucionarios, los creadores de moda, los técnicos de publicidad, etc., se enfrentan a la misma pregunta: ¿qué es una inestabilidad? ¿Cómo favorecerla o, por el contrario, prevenirse de ella? No obstante, la situación es aquí mucho más compleja que en física: contrariamente a las moléculas los hombres recuerdan, imaginan, establecen o inventan correlaciones, en resumen, son capaces de plantearse el problema de su propia existencia. Las «circunstancias» adquieren así significaciones multipicadas e incluso integran los relatos o los análisis mediante los que tratamos de interpretarlos. Las relaciones no lineales, cuyo papel crucial en física han comprendido los físicos, son aquí no solamente omnipresentes sino susceptibles de entremezclar los puntos de vista locales, las visiones globales, las

representaciones divergentes del pasado, del presente y del futuro. ¿Cómo entonces tratar de ignorar la singularidad de las cuestiones que plantea la historia de los hombres?

Tal es la promesa de coherencia que leemos en el devenir de la física. No una unidad que nos permitiría comprender el «sujeto» y el «objeto» en los mismos términos y llevar la evolución biológica, véase social, a las categorías de la fisicoquímica, sino la posibilidad de una articulación positiva entre las ciencias, de preguntas que nos las encierran en su especificidad sino que las abren a la posibilidad de preguntas a las que se enfrentan las demás ciencias.

En un libro reciente [7], Alian Bloom ha recordado la crítica dirigida por Swift a la racionalidad científica. Como perfectos cartesianos los habitantes de Laputa tienen un ojo dirigido hacia el cielo cuyas leyes matemáticas descifran, y otro dirigido hacia dentro, hacia su subjetividad egoísta. Y la isla volante de Laputa domina la Tierra gracias al poder técnico basado en el descubrimiento de los principios físicos. La ciencia seria así la aliada natural del poder que domina lo que ella prefiere ignorar, los hombres que no son ni figuras geométricas ni pura objetividad reflexiva.

El problema planteado por Swift es grave y no es de los que se puedan resolver mediante una simple transformación teórica. Sin embargo, podemos decir que la racionalidad científica ya no puede ser invocada hoy para justificar a los científicos que siguen el modelo de los habitantes de Laputa. En lo sucesivo, el enfrentamiento entre el objeto sometido a leyes intemporales y el sujeto libre, que domina el mundo, pero despojado de los múltiples lazos que entreteje con él, no puede llamarse «racional» en el sentido en que sería racional oponer el mundo «verdadero», «legal», que descubre la ciencia al mundo agitado donde vive el científico.

El ideal clásico de la ciencia, el descubrimiento de un mundo inteligible pero sin memoria, sin historia, remite a la pesadilla anunciada por Kundera, Huxley y, sobre todo, Orwell: en «1984» la propia lengua está desgajada de su pasado, y por consiguiente también de su poder de invención de futuros, contribuye a hacer prisioneros a los hombres en un presente sin

[7] A. Bloom, *L'Ame désarmée*, Paris, Julliard, 1987.

recurso ni alternativa. Esta pesadilla es la del poder, no ya la de la racionalidad científica. Esta no permite ya definir la supresión de la memoria, la eliminación de los relatos, la reducción de la imaginación como purificaciones, precio legítimo para la constitución de la sociedad en objeto de ciencia; por el contrario, ella lleva a caracterizarlas como mutilaciones destructoras de lo que se intenta comprender.

La cultura es profundamente histórica, tejida de relatos referentes al pasado, rememoración de sucesos que la han marcado y recreación continua del sentido de estos sucesos y de las posibilidades que abren. Al escribir este ensayo, que es de rememoración y de creación de sentido, participamos así, por redefinición, de la cultura o, lo que es más, de una cultura en la que, como hemos dicho en el capítulo precedente, la ciencia ha jugado desde el comienzo un papel singular. La lectura que hemos hecho de la física lejos del equilibrio, centrada en torno a la noción de evolución, se sitúa en esta tradición cultural. Ella apunta a suscitar nuevas sensibilidades, nuevas preguntas, nuevas perspectivas. Un «mismo» mundo y un mundo irreductiblemente múltiple: ésta es una idea que está presente en nuestra cultura pero que quedaba ajena a las ciencias, atrapadas en una estéril oscilación entre la unificación, reduccionista o visionaria, y la disgregación autárquica de las disciplinas. Esta es la idea que está presente en este libro. Como mostraremos en el siguiente capítulo, centrado en torno a la noción de atractor, la exploración de este mundo a la vez uno y múltiple sólo está en sus comienzos. Nuevos conceptos, portadores a la vez de aproximaciones inesperadas y de distinciones insospechadas, desestabilizan hoy las categorías mejor establecidas y establecen múltiples vías de comunicación entre las ciencias.

Capítulo 4

DE LO SIMPLE A LO COMPLEJO

¿Cómo definir la diferencia entre lo simple y lo complejo? La primera respuesta que viene a la mente, la respuesta tradicional, implica la noción de jerarquía. En un extremo, objetos deterministas y perfectamente inteligibles, como el péndulo. En el otro, los hombres y sus sociedades. En medio, el enigma de un progresivo proceso de «complejización», de «emergencia» de lo complejo a partir de lo simple. No obstante, la situación que hoy descubrimos es mucho más sutil. Dondequiera que dirijamos nuestra mirada encontramos una *mezcla* en la que lo simple y lo complejo coexisten sin oposición jerárquica. Sabemos, por ejemplo, que la aparente simplicidad del péndulo puede disimular un mundo de complejidad. En cuanto a las sociedades humanas, ¿no nos presentan la imagen misma de esta mezcla, suscitando a la vez la noción de «gobierno», que implica la posibilidad de describir y predecir, y de «historia», que remite a la creación compleja de nuevas relaciones con implicaciones y consecuencias poco previsibles? Quizá una de las lecciones más interesantes del «descubrimiento de la complejidad» es la que nos enseña a descifrar el mundo en que vivimos sin someterlo a la idea de una separación jerárquica en niveles.

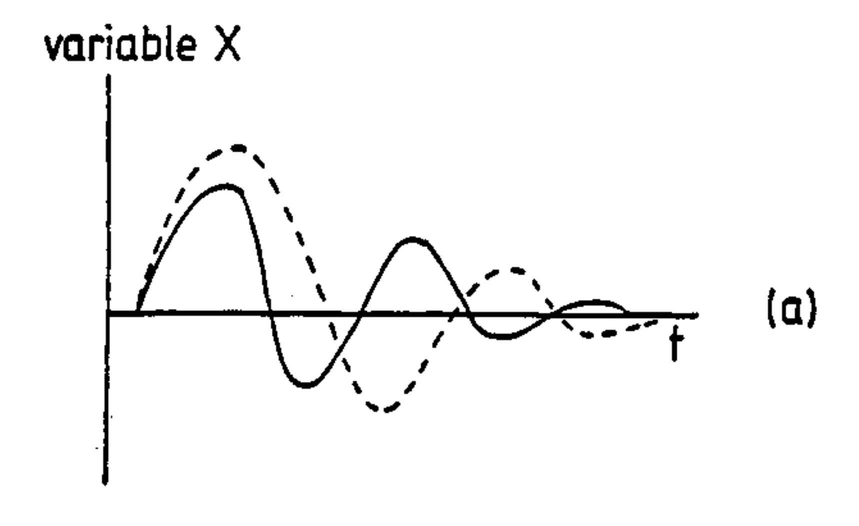
Con el fin de explorar esta renovación de las relaciones entre lo simple y lo complejo tomaremos como guía la noción de

atractor. Esta idea, como vamos a ver, pudo ser en el pasado símbolo de la homogeneidad: parecía que todos los sistemas sometidos a un atractor deberían «asemejarse». Hoy día, por el contrario, la idea de atractor simboliza la diversidad cualitativa de los sistemas disipativos.

La idea de estado atractor remite de hecho a la de sistema disipativo, productor de entropía. Un péndulo ideal, sin rozamiento, no tiene estado atractor sino que mantiene indefinidamente su movimiento de oscilación. En cambio, el movimiento de un péndulo real se amortigua poco a poco. En el caso del péndulo simple, la existencia del atractor que constituye su estado de equilibrio (en sentido mecánico) permite caracterizar cualquier movimiento pendular real con toda generalidad, sin que sea necesario conocerlo en su particularidad. Cualesquiera que sean la velocidad y la posición iniciales de un péndulo, sabemos en efecto cómo podremos describirlo si esperamos un tiempo suficiente: acabará por encontrarse en reposo en su posición de equilibrio. Análogamente, la existencia del atractor que constituye el estado de equilibrio termodinámico permite afirmar que una población de millones de billones de partículas en un recipiente aislado evolucionará hacia un estado cuya descripción sólo depende de un pequeño número de parámetros observables, tales como temperatura y presión.

Notemos de paso que el más pequeño rozamiento transforma radicalmente la definición de péndulo como objeto físico y nos hace pasar, para un tiempo suficiente largo, de la descripción de un movimiento perpetuo reversible a la de una evolución disipativa caracterizada por un estado atractor. Este es un ejemplo de «inestabilidad estructural», idea sobre la que tendremos ocasión de volver a propósito de la cosmología.

Para representar el atractor introducimos un espacio en el que dicho atractor está inmerso. Este espacio tendrá tantas dimensiones como variabes sean precisas para describir la evolución temporal del sistema. Los estados de equilibrio de los sistemas disipativos corresponden, por definición, a atractores *puntuales* representados por un punto en este espacio. Este es también el caso para los sistemas próximos al equilibrio termodinámico y sujetos al teorema de mínima producción de entropía. En todos estos casos, cualquiera que sea la preparación inicial del sistema, su evolución —bajo condiciones de contorno



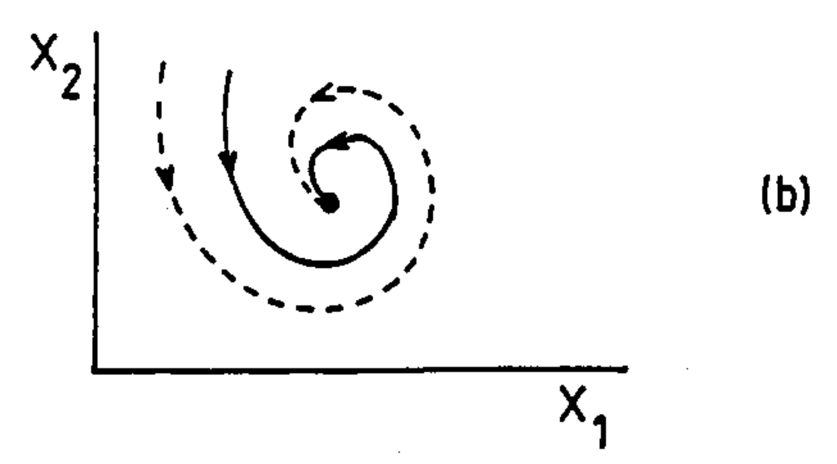


Figura 6.—*Estado atractor puntual caracterizado por dos variables independientes, X_1 y X_2: todas las evoluciones de que es susceptible un sistema caracterizado por condiciones de contorno dadas llevan al mismo estado.*
La figura (a) representa el comportamiento del sistema para dos posibles evoluciones temporales de una de sus variables. La figura (b) representa las mismas evoluciones en términos de las dos variables del sistema, X_1 y X_2.

dadas— podrá ser representada por una trayectoria que lleva del punto que representa el estado inicial al punto atractor. Este domina así la totalidad del espacio. Todos los sistemas representados por las mismas variables independientes y sujetos a las mismas condiciones de contorno «vuelven a lo mismo», conocen el mismo destino (*fig.6).*

El descubrimiento lejos del equilibrio de comportamientos coherentes, como el «reloj químico» con su período temporal bien definido, implica una primera ampliación de la idea de atractor. Aquí ya no se trata de un punto sino de una línea. Esta vez, cualquiera que sea la situación inicial, el sistema evoluciona hacia un «ciclo límite» *(fig. 7).*

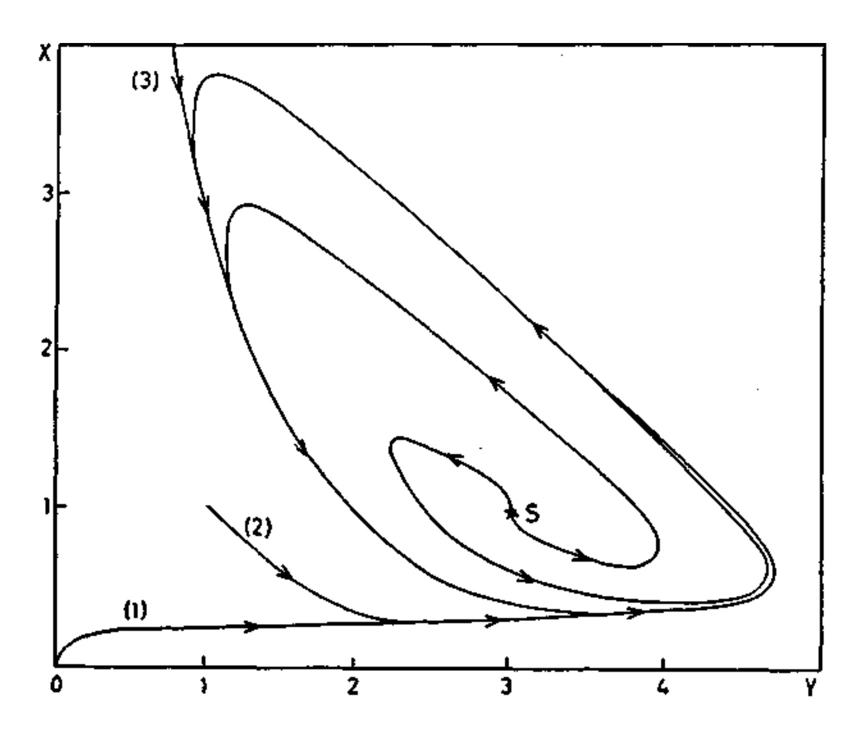


Figura 7.—*Ciclo límite representado, como en la figura (6-b), en el espacio construido a partir de sus dos variables independientes X e Y: todas las evoluciones de que es susceptible un sistema para condiciones de contorno dadas llevan al mismo comportamiento periódico.*

Un sistema caracterizado por un ciclo límite sigue siendo un sistema predecible que se puede describir de manera sencilla. Pero esta simplicidad tiene un carácter inesperado. Podemos representarnos el estado de equilibrio químico, imaginar el modo en que un gran número de procesos químicos compensan sus efectos mutuos del mismo modo que las muertes compensan los nacimientos en una población en equilibrio demográfico. Pero la idea de que millones de billones de moléculas, que sólo interaccionan mediante colisiones, actúan pese a ello «juntas» de suerte que el medio reactivo se vuelve por ejemplo rojo, después azul, después otra vez rojo, con una periodicidad del orden de un minuto, desafia la imaginación. Esta es una manifestación espectacular de las correlaciones de largo alcance que hemos discutido en el capítulo precedente. Sin la existencia de «relojes químicos», entre los que el más estudiado es la reacción de Belousov-Zhabotinski, ¿cómo aceptar la idea de esta «simplicidad» que ya no resulta de un caos indiferente de procesos individuales sino de una coherencia de conjunto en donde los procesos parecen remitir a un todo que, sin embargo, no les preexiste?

Hasta estos últimos años se creía que los únicos atractores posibles correspondían a variedades continuas, como líneas, superficies y volúmenes. Pero el descubrimiento de «atractores anómalos» ha abierto perspectivas nuevas. Los atractores anómalos no están caracterizados por dimensiones enteras, como una línea o una superficie, sino por dimensiones *fraccionarias*. Son lo que, siguiendo a Mandelbrot [1], se denominan variedades fractales.

¿Cómo puede ser fraccionaria una dimensión? En general, la dimensión define sencillamente un ente geométrico por el número de variables necesarias para situar uno de sus puntos. Así, sobre una línea sólo será necesario un número para situar un punto, dos números sobre una superficie, tres en un volumen, etc. Sin embargo, existen otras formas más abstractas de definir una dimensión. Tomemos por ejemplo una línea cuya longitud mide un centímetro. ¿Cuántos segmentos de 1/10cm de longitud serán necesarios para recubrir esta línea? Evidentemente, 10.

[1]. B. Mandelbrot, *Les Objects fractals*, Paris, Flammarion, 1984. Edición española: *Los objetos fractales*, Tusquets, Barcelona, 1987.

Pero, ¿cuántos cuadrados de 1/10 cm de lado serán necesarios para recubrir una superficie de 1 centímetro de lado? 100. Y 1.000 en el caso análogo de un cubo. Aquí, como se ve, la dimensión aparece en el exponente: 10, 10^2, 10^3. Esta progresión de exponentes la encontraremos cualquiera que sea la longitud *u* que caracteriza la longitud del segmento, el lado del cuadrado y la arista del cubo que son nuestras unidades de recubrimiento. No entraremos en los detalles técnicos de la definición de este tipo de medida, que implica un paso al límite de *u* tendiendo a cero. Lo esencial ya está dicho: cuando se caracteriza un ente geométrico por el número mínimo de «celdas» necesarias para recubrirlo, el cálculo de este número define la dimensión como *potencia* en la relación que liga el número N de dichas células y su tamaño *u*. Podemos entonces escribir $N=(1/u)^d$.

Hasta aquí parece que lo único que hemos hecho ha sido definir de manera complicada una idea sencilla. Sin embargo, si abandonamos los entes geométricos como la línea, el cuadrado o el cubo, para estudiar un ente fractal, comprenderemos la fecundidad de esta nueva definición. Un ejemplo clásico de fractal es el «conjunto de Cantor». Tomemos un segmento de longitud 1. Dividámoslo en tres partes iguales y suprimamos la parte central. Recomencemos la misma operación: dividamos por tres cada uno de los dos segmentos restantes y suprimamos la parte central (*fig8*). *El* algoritmo puede repetirse indefinidamente y lleva a la construcción de un conjunto infinito y no numerable de puntos no conexos. Entonces ya no podemos describir este conjunto en términos de longitud, pero la técnica de recubrimiento que hemos expuesto permitirá, no obstante, atribuirle una dimensión.

Después de la primera operación es evidente que son necesarios dos segmentos de longitud 1/3 para recubrir el ente geométrico creado. Tras la segunda, son necesarios cuatro de longitud 1/9. Tras la tercera, ocho de longitud 1/27. Tras la n-ésima operación el número N de segmentos necesarios es igual a 2^n, y la longitud u de estos segmentos es igual a $1/3^n$. La dimensión d del conjunto de Cantor está así definida, cuando n tiende a infinito y *u* tiende a cero, por la relación $2^n=(3^n)^d$; de donde $d=\lg 2/\lg 3$, es decir, aproximadamente 0,65. A este conjunto le corresponde entonces una dimensión fraccionaria comprendida entre O, la dimensión del punto, y 1, la de la línea.

De manera análoga podemos construir en un espacio de dos dimensiones objetos de dimensión comprendida entre 1 y 2, etcétera.

Muchos objetos en la Naturaleza se caracterizan por una dimensión fractal. Por ejemplo, una nube[2] no es ni un volumen ni una superficie sino un ente intermedio caracterizado por una dimensión comprendida entre 2 y 3. Actualmente, los algoritmos fractales son ampliamente utilizados en síntesis de imágenes y permiten construir con una facilidad y una «fidelidad» desconcertantes formas que, hasta ahora, suponían un desafio al ojo y la mano del diseñador.

El descubrimiento de atractores caracterizados por dimensiones fraccionarias permite transferir la nueva mirada que han supuesto los fractales desde el espacio de las formas al de los comportamientos temporales. Un atractor «fractal» será, como el conjunto de Cantor, una estructura extraordinariamente sutil. Las trayectorias que lo constituyen llenan literalmente una porción del espacio con sus pliegues y repliegues. Cuando examinamos uno de estos pliegues a una escala mayor descubrimos en el una nueva estructura semejante a la primera, de pliegue y repliegue, y así indefinidamente. Mientras que un atractor normal «dominaba» el espacio, ya que todas las trayectorias convergían hacia él, las trayectorias que constituyen un atractor fractal forman una multiplicidad indefinida.

Hasta hace poco, la existencia de un atractor había sido sinónimo de estabilidad y reproducibilidad: retorno a «lo mismo» a pesar de las perturbaciones, cualesquiera que sean las particularidades iniciales. A los nuevos tipos de atractores corresponden comportamientos «sensibles a las condiciones iniciales», que hacen que la noción de «lo mismo» pierda su sentido. Por cualquier región, por pequeña que sea, ocupada por el atractor fractal pasan tantas trayectorias como queramos, y cada una de estas trayectorias conoce un destino diferente de las demás. En consecuencia, situaciones iniciales tan próximas como se quiera pueden generar evoluciones divergentes. La más mínima diferencia, la más mínima perturbación, lejos de hacerse

[2] Véase S. Lovejoy, en *Science*, vol. 216, 1982, p. 185, y B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, San Francisco, Freeman, 1982.

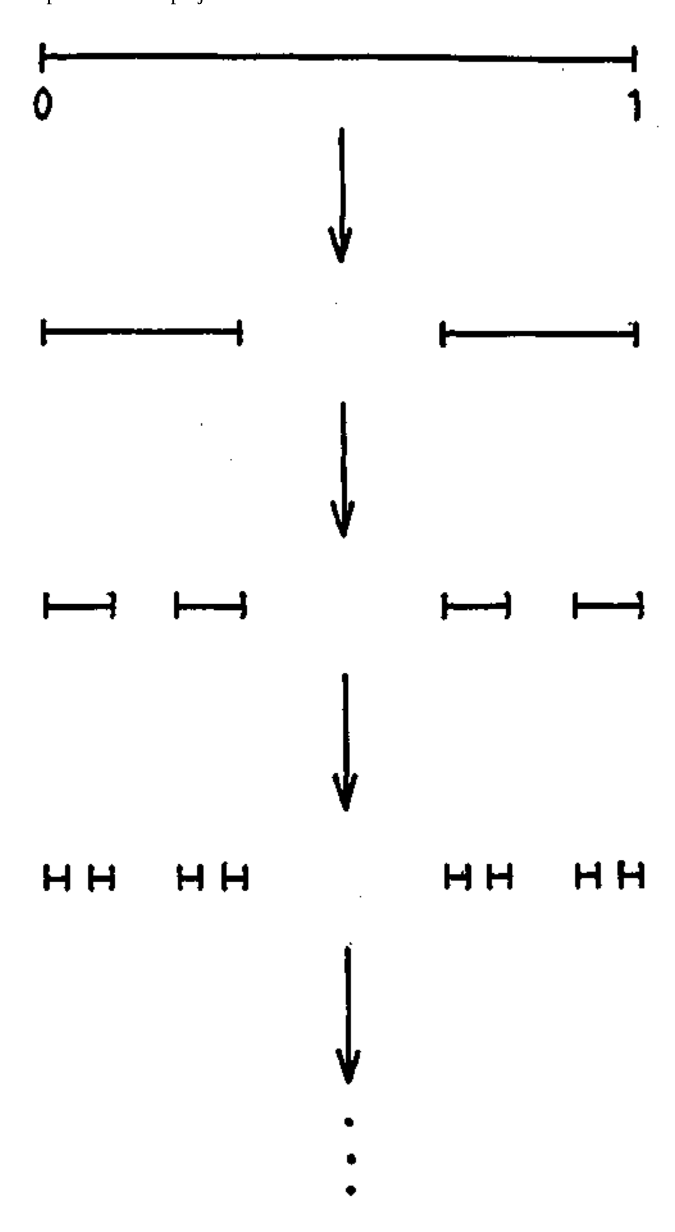


Figura 8. --*Construcción del conjunto de Cantor.*

insignificante por la existencia del atractor, tiene así considerables consecuencias.

La idea de causa ha estado siempre más o menos explícitamente asociada a la noción de «lo mismo» necesaria para dar a la causa un rango operacional. «Una *misma* causa produce, en circunstancias *idénticas,* un *mismo* efecto»; «si preparamos dos sistemas *idénticos* de la *misma* manera, obtendremos el *mismo* comportamiento...» Incluso los historiadores, cuando invocan una relación de causalidad, asumen el riesgo de pensar que si las circunstancias hubieran sido ligeramente diferentes —si el viento hubiera soplado con menos fuerza, si tal persona hubiese decidido llevar una Vestimenta diferente— la situación que analizan no habría sido modificada en lo esencial. Este riesgo es el de cualquier descripción o de cualquier definición. Las palabras, como los números, son de precisión finita. Cualquier descripción, verbal o numérica, define una situación no en tanto que idéntica a sí misma, sino en tanto que perteneciente a una clase de situaciones compatibles con las mismas palabras o los mismos números. Independientemente de la posibilidad de relacionarla con una clase de «sistemas iguales», la idea de causa se reduce así a una afirmación despojada de cualquier alcance cognitivo: sucede lo que «debía» suceder.

Ahora bien, debido a la propiedad de «sensibilidad a las condiciones iniciales», los atractores fractales, aunque regidos por ecuaciones perfectamente deterministas, ponen en cuestión esta posibilidad. ¿Cómo describir un sistema en un espacio de representación? Mediante números que representan los valores de las variables independientes que definen cada posible estado en este espacio. Por supuesto que es posible, ya lo hemos dicho en el capítulo precedente, que estos números sólo correspondan a valores medios pero en el caso de los atractores fractales hay que tener en cuenta además que la descripción mediante números sólo puede tener una precisión finita: lo que estos números pueden definir no es un punto sino una pequeña región del espacio tanto más restringida cuanto mayor sea la secuencia de decimales. Todos los puntos comprendidos en esta región designan así los «mismos» sistemas, pero estos «mismos» sistemas, si están caracterizados por un atractor fractal, no conocerán un destino convergente. Ellos pertenecen a trayectorias que *divergirán* en el curso del tiempo.

Llegamos aquí a la definición de comportamiento «caótico», que es un comportamiento típico de sistemas caracterizados por un atractor anómalo. Un comportamiento es caótico si trayectorias que salen de puntos tan próximos como se quiera en el espacio de las fases, se alejan unas de otras de manera *exponencial* en el curso del tiempo; la distancia entre dos puntos cualesquiera pertenecientes a tales trayectorias crece entonces proporcionalmente a una función $e^{1/\tau}$, donde $1/\tau$, por definición positivo para los sistemas caóticos, es el «exponente de Lyapounov», y T el «tiempo de Lyapounov».

El tiempo de Lyapounov permite definir una verdadera «escala de tiempos», la escala de tiempo con respecto a la que la expresión «dos sistemas *idénticos*» —dos sistemas que corresponden «a la misma descripción inicial» conserva un sentido efectivo. Después de un tiempo de evolución grande frente al tiempo de Lyapounov, el conocimiento que teníamos del estado inicial del sistema ha perdido su pertinencia y ya no nos permite determinar su trayectoria. En este sentido, los sistemas caóticos se caracterizan por un *horizonte temporal* definido por el tiempo de Lyapounov, horizonte que eventualmente podemos desplazar pero nunca anular. En efecto, si quisiéramos prolongar el tiempo durante el que podemos predecir una trayectoria en dichos sistemas aumentando la precisión de su definición y, por lo tanto, restringiendo la clase de los sistemas que consideramos como «los mismos», el precio a pagar se haría desmesurado rápidamente: por ejemplo, para multiplicar por diez el tiempo durante el cual la evolución es predecible a partir de sus condiciones iniciales, necesitaríamos aumentar la precisión en la definición de estas condiciones en un factor e^{10}... Como un verdadero horizonte, el horizonte temporal de los sistemas caóticos señala la diferencia entre lo que podemos «ver» desde donde estamos y lo que hay más allá —la evolución que ya no podemos describir en términos de comportamiento individual sino solamente en términos de comportamiento errático común a todos los sistemas caracterizados por el atractor caótico[3].

[3] En «Empirical Reality, Empirical Causality and the Measurement Problem» (*Foundations of Physics*, vol. 17, pp. 507-529, 1987), Bernard D'Espagnat propone mantener una relación privilegiada entre lo que él llama causalidad —o realidad— «empírica», e intersubjetividad. El dominio de lo empírico sería aquél en donde atribuimos a un sistema físico propiedades que, desde el punto de vista

En el curso de estos últimos años los físicos y los matemáticos han descubierto una multitud de sistemas caóticos y definido un cierto número de «rutas» hacia el caos. No entraremos aquí en los detalles técnicos y nos limitaremos a presentar un ejemplo particularmente sencillo ya que se refiere al objeto predecible y determinista por excelencia: el péndulo [4].

Consideremos un péndulo débilmente disipativo (cuyo movimiento se iría amortiguando si no se le mantuviera de alguna manera). Este péndulo es esférico: su peso es libre para oscilar no a lo largo de una curva plana sino sobre una superficie esférica. Imprimamos ahora a este péndulo un movimiento periódico. En lugar de estar suspendido de un punto fijo, el hilo del péndulo está suspendido de un soporte que se mueve periódicamente de adelante hacia atrás.

Una primera bifurcación tiene lugar cuando damos a T, período de la oscilación forzada, un valor igual 0,989 T_0, donde T_0 es el período propio del péndulo libre. A partir de este umbral, el movimiento de oscilación plano deja de ser estable mientras que aparecen dos modos de oscilación estables no planos de los que el péndulo escoge uno de ellos. Una segunda bifurcación tiene lugar para $T = 0{,}99887\ T_0$: el movimiento de oscilación deja de ser simple y aparecen oscilaciones lentas de período mayor; el péndulo sólo vuelve a la misma posición con respecto a su punto de apoyo cada seis períodos aproximadamente (*fig 9-a*). Aún se producen otras bifurcaciones que añaden subarmónicos a las frecuencias fundamentales y duplican el

de nuestras teorías fundamentales, sólo toman sentido por aproximación. Estas propiedades dependen entonces del hecho de que los sujetos se ponen de acuerdo para no tomar en consideración ciertos experimentos en principio posibles que permitirían falsarias. El «axioma de la realidad empírica»... «limita la sofisticación de las medidas en consideración por referencia ya a una libre decisión por nuestra parte, ya a limitaciones prácticas de las aptitudes de la especie humana». La noción de comportamiento caótico, caracterizado por un horizonte temporal, escapa no obstante a este análisis. En efecto, ella no supone ningún límite a la sofisticación de nuestras medidas. El horizonte temporal puede retroceder pero no puede ser anulado por las medidas de precisión creciente que autoriza la teoría. Permite así sustituir el acuerdo intersubjetivo sobre un límite superable conceptualmente por el reconocimiento de un límite intrínsecamente solidario de la misma noción de medida.

[4] Este ejemplo ha sido estudiado por John Miles (*Physica* D 11, 1984, p. 309). Está expuesto en el artículo de J. Lighthill, «The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics», en *Proceedings of the Royal Society*, Londres, A 407, 1986, pp. 35-50.

período de circulación del movimiento (*fig.9-b* y *c*). Finalmente, cuando el período T toma el valor 1,00234 T_0, desaparece cualquier regularidad. Ninguna frecuencia particular caracteriza ahora el movimiento que se ha vuelto completamente errático. La elección efectuada en la primera bifurcación ha sido olvidada: el sistema pasa de uno de los dos modos de comportamiento al otro.

La sucesión de transiciones entre ambos modos es aleatoria y varía de manera discontinua en función de las condiciones iniciales (*fig.9-d*). El movimiento pendular, generado sin embargo por un acoplamiento entre dos movimientos deterministas —el suyo propio y el que le es impuesto por el desplazamiento de su punto de suspensión— ha adquirido un comportamiento caótico.

La transformación de un movimiento periódico en comportamiento caótico es un fenómeno completamente general; afecta tanto a los sistemas débilmente disipativos, tales como el péndulo que acabamos de describir, como a los sistemas químicos puramente disipativos, como la reacción de Belousov-Zhabotinsky: en este caso, también lejos del equilibrio, el comportamiento pierde la regularidad que permitía hablar de «reloj químico» y se hace caótico. A la predecibilidad de un comportamiento regular generado por una multitud de procesos elementales, sucede, aún más inesperada, la compleja impredecibilidad de una actividad *colectiva* errática, exactamente lo contrario del desorden inerte que, en el equilibrio, permitía definir valores medios estables respecto a las fluctuaciones.

Acabamos de ver cómo la existencia de sistemas caóticos transforma la noción de impredecibilidad, la libera de la idea de una ignorancia contingente que podría ser superada simplemente con un mejor conocimiento, y le da un sentido intrínseco. Pero, ¿qué nos enseña el descubrimiento de atractores anómalos en lo que respecta a las descripciones probabilistas que utilizamos para describir fenómenos que somos incapaces de predecir de manera determinista? ¿Puede ayudarnos la noción de comportamiento caótico a comprender mejor estos sistemas y, en especial, la razón por la que no podemos predecir su comportamiento temporal?

Es evidente que en muchos casos las probabilidades reflejan

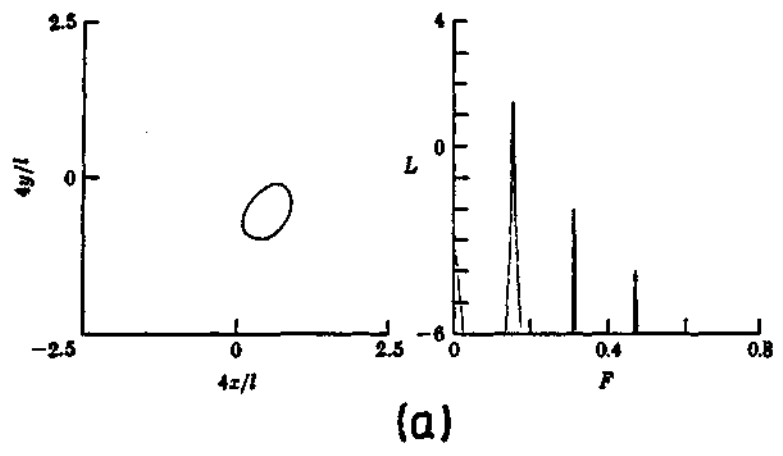


Figura 9.—*Comportamiento de un péndulo esférico de período propio T_0, para diferentes períodos T del movimiento al que está sometido su punto de suspensión (según Miles*[4]*). Este movimiento, de amplitud 1, tiene lugar en la dirección del eje x. El diagrama de la izquierda representa en el plano (x, y) la variación de la amplitud de la parte de la oscilación del péndulo que está en fase con el movimiento impuesto. En el caso de una oscilación simple, plana o no plana, este diagrama se reduciría a un punto. El diagrama de la derecha representa el espectro de frecuencias del movimiento pendular: el logaritmo L de la densidad espectral viene representado en función de F, razón entre la frecuencia y la frecuencia propia del péndulo.*

Figura 9-a.—*Período $T = 0{,}99922T_0$; el péndulo ha adoptado uno de los dos modos de oscilación compleja posibles (el segundo es simétrico respecto al primero con relación al eje x).*

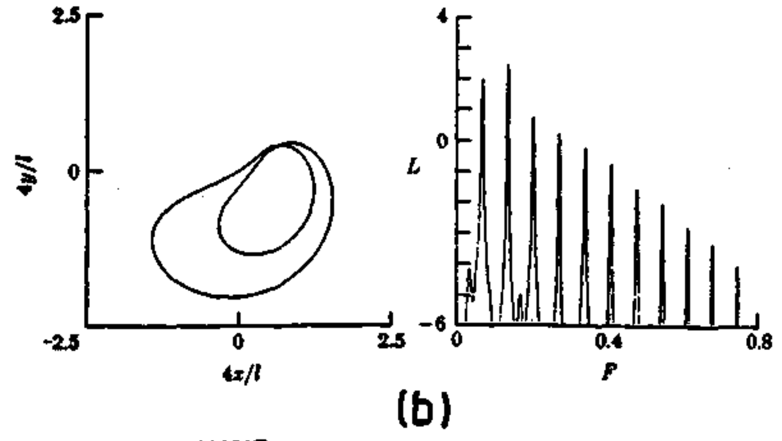


Figura 9-b.—*$T = 1{,}00156T_0$.*

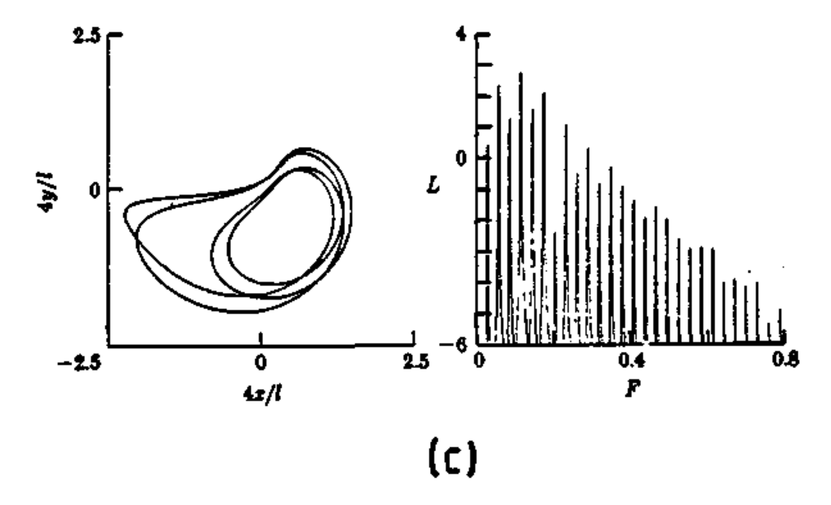


Figura 9-c.—$T = 1{,}00222T_0$.

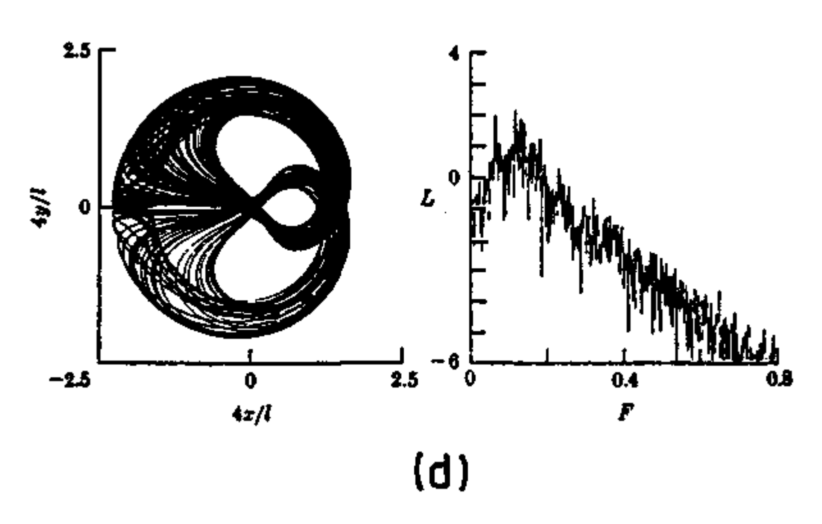


Figura 9-d.—$T = 1{,}00234T_0$. *El movimiento del péndulo se ha hecho caótico y permanece durante intervalos de tiempo de longitud variable en uno u otro de sus dos modos posibles.*

una ignorancia: demasiados factores entran en juego en un suceso para que podamos predecirlo. Este es el caso, por ejemplo, de las estadísticas sobre sucesos tales como matrimonios, divorcios, nacimientos, defunciones, etc. Cada uno de estos sucesos es el resultado de una historia que los datos cifrados sólo pueden ignorar.

Sin embargo, ¿es siempre así? Tomemos el ejemplo del clima. Por supuesto, todos sabemos que el clima es el resultado de múltiples circunstancias. La existencia de microclimas, la variabilidad del clima en función de la situación ecológica, el papel del relieve, etc., implican que las variaciones climáticas integran una multitud de variables. Sin embargo, el clima plantea otros problemas. Sabemos que el clima terrestre ha conocido globalmente cambios enormes que han jugado un papel esencial en la historia de la Tierra. Por ejemplo, hace dos o trescientos millones de años el clima era mucho más suave que en la actualidad: prácticamente no había hielo sobre los continentes y el nivel de los océanos estaba unos 80 m por encima del nivel actual. Fue durante la era terciaria, hace cuarenta millones de años, cuando se acentuó el contraste entre la temperatura de los polos y la de las zonas ecuatoriales, desencadenando una profunda transformación del régimen de intercambio de calor entre las altas y las bajas latitudes que amplificó aún más el fenómeno. No es necesario recordar la serie de glaciaciones que han jalonado la era cuaternaria. Hace siete mil años, tras el retroceso de los glaciares, la Tierra conoció lo que normalmente se llama un «óptimo climático»: es la época —que terminó hace tres mil años, al comienzo de la edad de hierro— en la que el Sahara conocía una próspera agricultura. ¿Cómo explicar estas enormes variaciones a gran escala de tiempos? ¿Necesitamos invocar causas extrínsecas, por ejemplo variaciones del flujo de energía solar, para explicar este fenómeno? ¿O bien estaríamos frente a variaciones erráticas, generadas por una dinámica global, como las que acabamos de describir?

Reconocer entre los fenómenos que se presentan como aleatorios aquéllos que podrían estar producidos por un atractor caótico es, evidentemente, de fundamental importancia. Pensemos, por ejemplo, en el problema, hoy tan crucial, de la acción del hombre sobre el medio ambiente. Para comprender la naturaleza y el alcance de esta acción es necesario elucidar los

modos intrínsecos de comportamiento de este medio, distinguir las variaciones debidas a causas específicas y las que, eventualmente, resultan de una dinámica intrínseca. Pero, ¿cómo reconocer la existencia de un atractor caótico?

¿De qué tipo de conocimiento disponemos normalmente? Muy a menudo ignoramos la identidad y el número de variables que rigen el eventual atractor. En general no disponemos más que de una serie de valores de la temperatura en una región del globo. Estamos entonces frente a un problema inverso de los que se les plantean habitualmente a los matemáticos. Se puede deducir a partir de la evolución generada por un sistema de ecuaciones la evolución de una de sus variables en el curso del tiempo (véase, por ejemplo, la *fig.6-a)*. Aquí, en cambio, se trata de servirse de una serie temporal de valores de una variable como de una huella a partir de la cual podremos aprender a descifrar el tipo de mecanismo evolutivo del que esta serie es el resultado final.

Reconocer un atractor puntual a partir de tal serie no ofrece ninguna dificultad: la serie evolucionará hacia un determinado valor que luego se mantendrá constante en el curso del tiempo. Igualmente fácil es reconocer un ciclo límite. En este caso la serie adoptará una forma periódica fácilmente identificable con los métodos clásicos. Pero una serie generada por un atractor caótico de dimensión fractal no muestra ninguna periodicidad de este tipo. Y sin embargo podemos detectar tal atractor, caracterizar su dimensión fractal, determinar el número mínimo de variables independientes que implica y estimar el límite de predecibilidad del comportamiento caótico.

Esbocemos aquí, sin entrar en los detalles matemáticos, el método propuesto por Grassberger y Proccacia [5]. Disponemos, pues, de informaciones referidas a una sola variable. Los valores que toma esta variable X en el curso del tiempo están determinados por sus relaciones con otras variables de las que ignoramos no solamente su identidad sino también el número. Sabemos que una ecuación con n variables puede reescribirse en general como una ecuación con una sola variable pero de un orden más elevado: el comportamiento del sistema no está ya únicamente

[5] P. Grassberger e I. Procaccia, en *Physica*, 9 D, 1983, pp. 189-208.

determinado por los valores iniciales de sus n variables sino por los valores iniciales de la variable y de sus n primeras derivadas. Evidentemente no disponemos de estos valores iniciales, e ignoramos el valor de n, pero disponemos en cambio de una serie temporal de la que vamos a extraer d series parciales. Cada una de estas series parciales contendrá, como la serie original, valores de X equidistantes en el tiempo, pero cada una tendrá como punto de partida este valor en un instante inicial desplazado. El valor inicial de las distintas series será así X_0, X_T, X_{2T},... $X_{(d-1)T}$. El método consiste en buscar el valor de d, d_c, para el que estas series dejan de ser independientes unas de otras. El valor d_c determina la dimensión n del sistema dinámico. Por lo que respecta al atractor, éste formará un conjunto (fractal o no) de dimensión inferior a d_c.

¿Qué sucede si el fenómeno es puramente aleatorio? Por mucho que aumentemos d no se establecerá ninguna correlación entre los valores de las series parciales. La dimensión del sistema, y la del atractor, son entonces, por convención, infinitas.

¿Cuál es el caso de la variación climática que ha jalonado la historia de nuestro planeta? G. y C. Nicolis han estudiado la serie de temperaturas que se puede inferir a partir de la proporción del isótopo de oxígeno O^{18} en sedimentos (provenientes en este caso de la zona ecuatorial del Pacífico). Su análisis [6] permite pensar que en efecto ha sido generada por un atractor caótico, caracterizado por una dimensión 3,1. Un atractor tal está inmerso necesariamente en un espacio de al menos cuatro dimensiones (luego, aquí, n = 4). En otras palabras, este resultado implica que un sistema de cuatro variables independientes podría bastar para explicar la historia «caótica» del clima terrestre.

Este resultado abre perspectivas inesperadas. La variación de temperatura puede interpretarse en efecto como resultado de un gran número de variables, que van desde la salinidad del agua a las manchas solares, las erupciones volcánicas, etc., estando sometida cada una de los cientos de variables de este tipo a una distribución estadística. Ahora bien, lo que nos indica este análisis es que, ¡bastarían solamente cuatro variables indepen-

[6] C. Nicolis y G. Nicolis, «Is there a Climatic Attractor?», en *Nature*, vol. 311, 1984, pp. 529-532.

dientes para definir la variación del clima terrestre en grandes escalas de tiempo!

Igualmente han sido estudiadas series de datos extraídos de medidas de la actividad cerebral a partir de un encefalograma [7]. En el estado de sueño profundo la actividad cerebral tendría los rasgos del caos determinista y estaría caracterizada por un atractor fractal con cinco variables independientes. En cambio, en el estado de vigilia no se detecta ningún atractor: la actividad cerebral no puede representarse como un sistema dinámico autogenerado cuando participa de un régimen de existencia abierto a lo que le rodea. Finalmente, durante las crisis epilépticas puede detectarse de nuevo un atractor fractal pero en un espacio, ¡que podría estar definido solamente por dos variables! * La epilepsia, lejos de ser asimilable a un comportamiento irregular, se caracterizaría por el contrario por una «regularidad» demasiado grande de la actividad cerebral... El «desorden mental» aparecería, desde este punto de vista, como la situación fisiológicamente normal.

Podemos admirar en este punto de qué modo el análisis matemático coincide con las meditaciones de Valéry: el cerebro es la inestabilidad misma y, sin duda, no es una casualidad sino un reflejo del papel que la evolución biológica ha conferido a este «órgano» que es el de nuestra más aguda sensibilidad respecto a nosotros mismos y a nuestro entorno.

Evidentemente, el valor del análisis depende del hecho de que la variable medida conserva su identidad en el curso del tiempo y que la muestra a medir permanece invariante. Por esta razón es por lo que el análisis de series de datos económicos, por ejemplo, plantea problemas muy complicados [8]. Mas la cuestión de saber

[7] A. Babloyant, J.M. Salazar y C. Nicolis, «Evidence on Chaotic Dynamics in Brain Activity During the Sleep Cycle», en *Physics Letter*, vol. 111 A, 1985, pp. 152-156. A. Babloyantz y A. Destexhe, «Low Dimensional Chaos in Epileptic Seizure», en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 83, 1986, p. 351.

[8] Véase en particular *Laws of Nature and Human Conduct*, ed. I. Prigogine y M. Sanglier, Bruselas, C.O.R.D.E.S., 1987.

* Estrictamente hablando, en un sistema dinámico en dos variables los únicos atractores posibles son atractores puntuales (de dimensión 0) o ciclos límites (de dimensión 1). El atractor que detectan Babloyantz y Destexhe durante la crisis epiléptica tiene una dimensión fractal de $2{,}05 \pm 0.09$ y está inmerso en un espacio de dimensión 5. Sin embargo, sólo dos de estas variables tienden a generar un comportamiento periódico y caracterizan casi por completo el estado del sistema. [N. del T.]

si los ritmos de la economía pueden ser esclarecidos por la noción de caos determinista, si lo que vivimos como «choques» o «crisis» económicas exógenas no es generado de manera autónoma por un sistema complejo fuertemente inestable, está hoy en el centro de las investigaciones que llevan a cabo los economistas.

El estudio de los atractores ilustra la inmensa variedad de los sistemas disipativos. Muy a menudo coexisten diferentes tipos de sistemas. Este es sin duda el caso de los seres vivos. Los grandes mecanismos de regulación metabólica no están llamados evidentemente a un comportamiento caótico: sabemos además que algunos de ellos corresponden a un régimen de actividad de tipo ciclo límite. Pero otros aspectos de la actividad del organismo vivo son eminentemente imprevisibles. Podemos reconocer así, en un mismo ser vivo, el tipo de contraste que, desde hace tanto tiempo, ha conducido a la distinción entre el mundo celeste —podemos predecir hoy la posición que tendrá la Tierra dentro de cinco millones de años— y el mundo sublunar, lugar de los fenómenos meteorológicos que todavía nos son difíciles de predecir con más de quince días de antelación.

Llegamos ahora a una cuestión todavía más ambiciosa. Hasta aquí, hemos explorado la riqueza múltiple del mundo lejos del equilibrio pero nuestras preguntas se han limitado al tipo de problemas que es más familiar a los físicos: dado un sistema, ¿de qué es capaz? Por ello todavía no hemos abordado la gran diferencia existente entre los fenómenos hidrodinámicos, como la inestabilidad de Bénard (véase el cap. 3), y los procesos químicos. Los primeros desaparecían cuando desaparecía la ligadura de no-equilibrio, pero los procesos químicos son creadores de nuevas estructuras materiales que constituyen de alguna manera las huellas y los testimonios de las condiciones de su propia formación. Aquí, la irreversibilidad no se limita a conferir a la materia un comportamiento transitorio o fugaz: ella es susceptible de inscribirse en esta materia.

Tomemos para empezar el ejemplo de los copos de nieve. Si un copo está constituido por cristales muy regulares, esféricos, podemos deducir que se ha formado cerca del equilibrio. Si, por el contrario, sus cristales presentan una estructura con ramas bien desarrolladas es que se ha formado lejos del equilibrio: el crecimiento ha sido muy rápido y las moléculas no han tenido

tiempo de difundirse regularmente sobre la superficie. Actualmente el estudio del cristal ideal se substituye por el de los cristales concretos de los que cada uno constituye, por su estructura singular (defectos, dislocaciones, etc.), una memoria del camino tomado en el momento de su formación. De esta forma pueden obtenerse nuevas propiedades eléctricas, magnéticas, mecánicas, ópticas, que no dependen de una definición general del material sino de su historia.

Pero es la actividad química la que da a la irreversibilidad todo su poder creador de estructuras. Las moléculas no incorporan solamente la marca de las condiciones irreversibles de su formación: ellas deben su misma existencia a esta irreversibilidad. Algunas sólo pueden formarse en un medio alejado del equilibrio. Los químicos lo saben bien pues ellos juegan siempre con las condiciones de la reacción para crear nuevas moléculas. La química «crea su objeto», decía el químico Berthelot, y esta creación, a su vez, suscita nuevas preguntas. ¿De qué nuevas historias pueden ser capaces estas criaturas de la irreversibilidad?

Evidentemente lo que se perfila aquí es la enigmática cuestión del origen de la vida. ¿Podemos hacer de la inscripción de la irreversibilidad en el seno de la materia uno de los elementos de explicación de esta mutación radical que constituye la aparición de los seres vivos?

Las biomoléculas actuales son tanto actrices como productos de la actividad metabólica disipativa que crean e implican a la vez. Pero, ¿qué es de los ancestros de estas biomoléculas? ¿Cómo explicar que hayan podido crearse en número suficientemente grande para que se pueda iniciar el nuevo tipo de historia en la que en adelante participan sus descendientes? ¿Cómo explicar la transición entre una historia de tipo «químico», en la que se sintetizan moléculas individuales, y una historia «biológica» en la que estas diferentes síntesis se hacen interdependientes, en la que las moléculas ya no son solamente estructuras complejas particulares sino actores cuya existencia depende de la actividad de otros actores y cuya actividad es necesaria para la existencia de éstos? ¿Cómo pasar de la idea de «condiciones generales de síntesis», del tipo de las que manipulan los químicos, a la de «información», a la del «mensaje» que constituye una molécula *para* otras moléculas? ¿Cómo diferentes biomoléculas han adquirido sentido unas respecto a otras?

Algunos [9] piensan hoy que la vida habría aparecido en torno a las fuentes cálidas submarinas que proliferan a lo largo de las dorsales activas. El agua rica en metales que brota de estas fuentes a una presión de unas 275 atmósferas puede alcanzar 350° C y entra en contacto con el agua fría del océano: se trata entonces de una situación de intenso no-equilibrio, único en su género sobre la Tierra. ¿Quizá las diferentes fuentes cálidas que nacen y mueren a lo largo de las dorsales han sido así lugar de «experimentos» múltiples, y quizá una de las chimeneas hidrotermales fósiles, olvidada en alguna parte de una dorsal, es el desierto lugar donde nació la vida? Si el camino emprendido por la historia de la vida tuvo por origen la ebullición de las aguas opacas salidas de las bocas hidrotermales podríamos decir en verdad: *en el principio era la actividad* —la actividad química intensa, productora de moléculas complejas y diversas, concentrada en torno a las fracturas de la corteza terrestre donde la Tierra misma está en transformación, alimentada por la gigantesca producción de entropía que acompaña este devenir. ¿La vida hija de la Tierra antes de ser hija del Sol?

Sin embargo se plantean otras cuestiones. ¿Podemos caracterizar el tipo de moléculas al que pudieron pertenecer los ancestros de nuestras biomoléculas, estas primeras biomoléculas complejas que «adquirieron sentido» unas respecto a otras? Dicho de otro modo más preciso, ¿podemos imaginar un mecanismo de reacción susceptible de sintetizar un tipo de moléculas capaces de hacerse «portadoras de información», capaces, como lo son nuestras actuales biomoléculas, de jugar un papel específico en otras reacciones? La irreversibilidad, hechos dicho, se inscribe en la materia. ¿Cómo puede inscribirse de modo que las estructuras que crea sean capaces de convertirse en actrices de otra historia?

Parece que en este mundo debería sernos útil la teoría de la información, en tanto en que se propone caracterizar por una medida cuantitativa el contenido de información de una secuencia formada —como lo están las biomoléculas actuales, pero también nuestros textos, nuestras partituras musicales, etc.—, por un «alfabeto» determinado.

[9] Véase en particular J.B. Corliss, J. A. Baross y S. E. Hoffman, actas del 26.° Congreso Internacional de Geología, París, julio 1980, *Oceanologica Acta Special Issue.*

La definición más clásica de información se debe a Shannon[10]. Según esta teoría la información mediría la «sorpresa» que manifestamos al descubrir cada letra de una secuencia. Así, la información más rica correspondería a una secuencia completamente aleatoria: en este caso la lectura de los 99 primeros «caracteres» no ayuda en nada para predecir el 100°. Esta idea remite a los textos que compondría el famoso mono mecanógrafo imaginado por Borel en la hipótesis, poco creíble, de que realmente golpeara las teclas de su máquina de manera puramente aleatoria.

¿Quién tendría la paciencia de leer todos estos «textos» producidos por el mono mecanógrafo de Borel en busca de lo que «tenga sentido» o anuncie la posibilidad de un sentido? ¡Cada uno sería un suceso único, diferente de todos los demás! En uno podría figurar por azar una secuencia de palabras que tenga sentido, pero esta secuencia ya no existiría en el próximo ensayo. La definición de Shannon no esclarece la cuestión de las primeras «biomoléculas» más de lo que lo hace con la cuestión de saber lo que es un texto— que no tiene nada que ver con una secuencia puramente aleatoria puesto que está limitado por distintos tipos de reglas y muestra regularidades estadísticas características. A priori son posibles 20^{100} secuencias proteínicas de cien aminoácidos si cada uno de los 20 tipos de aminoácidos tiene la misma probabilidad de ocupar cada una de las 100 posiciones. En el sentido de Shannon esto quiere decir que cada una de las 20^{100} secuencias tiene un contenido de información muy alto, pero, ¿cómo concebir que en una indefinida diversidad de este tipo hayan podido tomar sentido algunas secuencias? Si el mecanismo original de formación de las primeras biomoléculas hubiera sido el carácter aleatorio de la actividad del mono de Borel, la historia cuyo origen tratamos de comprender remitiría al azar más puro, más ininteligible. La síntesis de cada secuencia particular constituiría un suceso único, eencialmente no reproducible.

Para que una secuencia o una familia de secuencias tenga una probabilidad de emerger de entre el conjunto de posibles indiferenciados, de singularizarse mediante propiedades «interesantes»

[10] Véase C.E. Shannon y N. Weawer, *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, University of Illinois Press, 1949.

en tal o cual situación, resulta necesario restringir la población de los posibles, es decir, aumentar la probabilidad de formación de cada uno de ellos.

¿Cómo «programar» entonces al mono mecanógrafo para que siga ciertas reglas, para que no golpee cualquier tecla? Si pudiéramos determinar a priori *lo* que queremos, lo que constituye una «propiedad interesante», podríamos dirigirnos a la teoría algorítmica de la información propuesta por Chaitin y Kolmogoroff[11]: la medida de la información sería entonces la longitud del programa que sería preciso dar a un ordenador —o al mono de Borel— para que éste sea capaz de realizar la estructura que deseamos. Tal definición tiene el inconveniente de presuponer que podernos definir a priori lo que es indispensable en un mensaje. Por supuesto, éste es el caso en matemáticas. Por una razón completamente diferente es también el caso para la obra de Shakespeare o los cuartetos de Beethoven: aquí, la información tiene por única medida la propia obra; en efecto, ningún programa más corto que esta obra permitiría reproducirla, sino solamente mutilarla o negarla. Pero, de modo general, la medida de la información tal como la proponen Kolmogoroff y Chaitin está limitada por el hecho de que ella remite implícitamente a la finalidad de lo que se pide al ordenador que reproduzca. Su definición no es, por tanto, neutra sino que supone un contexto operacional en el que las significaciones y las relaciones entre medios y fines están fijadas a priori. Ella implica, entonces, que la historia cuyo nacimiento intentamos comprender existe ya, portadora de la distinción entre lo que es ruido y lo que es pertinente.

¿Cómo caracterizar secuencias de unidades elementales que no fueran ni puramente aleatorias ni repetitivas y que, por consiguiente, pudieran constituir la población suficientemente diversa y suficientemente estable al mismo tiempo, en cuyo seno han podido identificarse los primeros actores de la historia de la vida? ¿Cómo «enseñar» al mono mecanógrafo a restringir los posibles sin hacer entrar en juego una finalidad que presupone la historia cuyo origen tratamos de comprender? ¿Cómo podría la actividad disipativa «codificar» en la materia un mensaje que,

Véase G. Chaitin, *Scientific American*, mayo 1975, p. 47.

para retomar la bella expresión de Henri Atlan, no sea ni cristal ni humo?

De hecho, conocemos una manera de reducir la diversidad sin por ello anularla. Lo que se denominan la «cadenas de Markov» no resultan ni de un proceso puramente aleatorio ni de un algoritmo determinista. En el primer caso, el conocimiento del comienzo de la secuencia deja su continuación completamente indeterminada; en el segundo, este conocimiento debería permitir predecirla. En el caso de la cadena de Markov, cada uno de los términos que puedan seguir a un término o una secuencia de términos dados está caracterizado por una probabilidad. Las probabilidades de transición son así ligaduras que estructuran la secuencia y restringen, sin anularla, la «sorpresa» sobre la que insistía Shannon. ¿Podemos imaginar un mecanismo «natural» de producción de tal cadena? Nicolis y Subba Rao [12] han aportado una interesante contribución a esta cuestión.

El modelo propuesto supone un mecanismo de reacción en el curso del cual tres monómeros, X, Y, Z, se transforman uno en otro. Además, X, Y, Z, son susceptibles de agregarse a una cadena polimérica en formación* Hacemos la hipótesis de que este mecanismo de polimerización introduce un elemento discreto: cada vez que la concentración de X traspasa un determinado umbral un monómero X se añade a la cadena. Lo mismo sucede con Y y Z. La formación de la cadena constituye así una especie de memoria que registra lo que al mismo tiempo define como «suceso» que afecta al medio reactivo.

Imaginemos primero que la reacción entre X, Y y Z tiene lugar cerca del equilibrio, es decir, que el paso de los umbrales está sujeto a las fluctuaciones desordenadas, no correlacionadas, que afectan al estado estacionario. En este caso, cada eslabón del polímero tiene las mismas probabilidades de estar ocupado por cada uno de los tres, igual que cada lanzamiento de un moneda (ideal) tiene las mismas oportunidades de caer sobre cada una de sus dos caras: se trata de una cadena que corresponde a la definición de Shannon de la información máxima.

[12] G. Nicolis y S. Subba Rao, «Generation of Spatially Asymetric Information-Rich Structures in far from Equilibrium Systems», en *Coherence and Chaos in Dynamical Systems*, Manchester University Press, 1987.

Podemos concebir fácilmente otra situación. Supongamos que X, Y, Z intervienen en una reacción química oscilante del tipo «reloj químico». En este caso, la cadena formada presentará una regularidad periódica del tipo XYZXYZXYZ. El examen de una secuencia semejante nos indicará entonces que se ha formado en condiciones de no equilibrio, más allá de una bifurcación que conduce a un reloj químico. Pero tampoco en este caso una molécula así puede tomarse como un modelo de biomolécula. Esta vez la diversidad es demasiado débil. La información no es «incomprensible»; en el sentido de Kolmogoroff-Chaitin se reduce a la instrucción: tomar n veces la secuencia XYZ (u otra secuencia).

¿Cómo obtener una secuencia que no sea ni puramente aleatoria ni repetitiva, una secuencia que tenga el tipo de reproducibilidad estadística que caracteriza a las cadenas de Markov? El caos determinista corresponde a este caso intermedio entre el puro azar y el orden redundante. El carácter errático —aunque no puramente aleatorio— de la actividad disipativa generada por un atractor caótico puede inscribirse efectivamente en la materia bajo la forma de las ligaduras probabilistas que caracterizan las cadenas de Markov. Nicolis y Subba Rao han mostrado que si la producción de X, Y y Z está ligada a una reacción química caracterizada por un atractor caótico (para el caso en cuestión el modelo de Rossler [13]), la secuencia generada tendrá las tres características generales propias de las cadenas de Markov y que podemos esperar de cualquier texto, incluido el «texto» que constituyen las biomoléculas que hoy conocemos: no repetitividad, existencia de correlaciones de largo alcance, ruptura de simetría espacial, es decir, distinción de un sentido de lectura del texto en el cual las correlaciones son aparentes.

En efecto, la secuencia de aproximadamente 10.000 unidades obtenida mediante una simulación puede reescribirse utilizando tres hipersímbolos correspondientes respectivamente a ZYX, ZXYX y ZX, lo que implica que quedan excluidas algunas subsecuencias tales como el doblete XX o el triplete YXY. Además, esta secuencia se aproxima a la de una cadena de Markov de quinto orden: dado un quintuplete, o secuencia de

[13] O. Rossler, en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 316, 1979, p. 376.

cinco letras, la identidad de la sexta tiene una probabilidad bien determinada. Entre las probabilidades condicionadas que definen la aparición de una letra dadas las cinco precedentes, aproximadamente la mitad resultan ser iguales a uno. La cadena así obtenida no es repetitiva sino extremadamente improbable a priori; así, de entre todas las secuencias de siete letras que pueden ser formadas a priori (37 secuencias, es decir 2.187), sólo 21 son realizadas de hecho por la dinámica caótica. Es difícil evitar la comparación entre las ligaduras estadísticas que produce la conjunción de una dinámica caótica con umbrales discretos, y el conjunto de «reglas gramaticales» que constituye la diferencia entre una secuencia tecleada de manera aleatoria por el mono de Borel y un verdadero texto.

Este modelo, en verdad muy esquemático, muestra que la irreversibilidad de la actividad disipativa puede inscribirse en la materia y determinar en ella la creación de un existente realmente nuevo: una secuencia con simetría espacial rota, una secuencia que adquiere un sentido intrínsecamente diferente, independientemente de su contenido preciso, si un lector la lee comenzando por el «principio» o por el «final».

El hecho de que podamos estar tentados en este punto de hablar de «génesis físico-química» de la información no significa, desde luego, una reducción de la historia a las leyes fisicoquímicas; por el contrario, pone de manifiesto la riqueza irreductible de las relaciones entre procesos, sucesos y circunstancias que toman sentido lejos del equilibrio. Pues las preguntas comienzan por supuesto en esta etapa. Las moléculas «markovianas» no explican la historia sino únicamente el «terreno» en el que ha podido nacer. ¿Para quien tomará sentido la «información» cuya fuente ha podido ser la actividad caótica irreversible? ¿Qué papeles jugarán estas nuevas moléculas y cómo reaccionará este papel sobre su fuente? Aquí se anuncia la necesidad de un nuevo tipo de narración, es decir, de una toma de relevos entre dos tipos de historia.

Evidentemente sólo estamos en el primer paso. Se está abriendo un nuevo capítulo en la historia de la química. Hasta finales del siglo XVIII la química ha sido «ciencia de la Naturaleza» por excelencia. El laboratorio del químico era el escenario cerrado en el que el químico intentaba reproducir, modificar, acelerar los procesos que se producen en el «laboratorio» de la

Naturaleza. Quizá el estudio de lo que la materia es capaz, cuando existen simultáneamente mecanismos de interacción no lineales y ligaduras de no-equilibrio, nos coducirá a reencontrar el asombro de los primeros químicos, a resucitar la antigua imagen de la química, ciencia de las transformaciones de la materia.

Hasta aquí, hemos dedicado nuestra exploración al descubrimiento de los sistemas disipativos, dominio en el que el camino recorrido ha sido espectacular. No hace todavía tanto tiempo que la noción de estado de equilibrio orientaba hasta tal punto nuestros juicios que la actividad disipativa había llegado a identificarse con la evolución hacia la uniformidad. Ciertamente, y en particular con el teorema de mínima producción de entropía, el no-equilibrio había llegado a ser objeto de ciencia, mas en lo sucesivo comprendemos mejor los límites de validez de este teorema: se debe a que, cerca del equilibrio, las leyes de evolución son lineales. Esto ya no sucede lejos del equilibrio y ahora empezamos a conocer el papel esencial de las no linealidades, ya sea en la producción de la sorprendente coherencia de ciertas estructuras disipativas, o en el comportamiento errático, igualmente sorprendente, de los regímenes de actividad caótica. Lejos del equilibrio los procesos ya no pueden comprenderse a partir de estados en los que, en promedio, compensan sus efectos. Ellos se articulan en disposiciones singulares, sensibles a las circunstancias, susceptibles de cambios cualitativos, disposiciones que permiten dar sentido a una idea hasta ahora inconcebible: explicar la novedad sin reducirla a una apariencia.

La termodinámica clásica pudo prolongarse a los dominios próximos al equilibrio pero ha tenido que transformarse radicalmente para entrar en el nuevo mundo de los procesos no lineales lejos del equilibrio. Otras ciencias han conocido, en el curso de los últimos años, un cambio semejante. En los capítulos siguientes mostraremos cómo la dinámica, la mecánica cuántica, e incluso la cosmología, largo tiempo dominadas también por un ideal de inteligibilidad estático, descubren hoy caminos que las conducen al problema del devenir.

Capítulo 5

EL MENSAJE DE LA ENTROPÍA

En las primeras páginas de este libro hemos invocado dos nombres, los de Boltzmann y Bergson. Hemos recordado la lucha que mantuvo Boltzmann para integrar el segundo principio de la termodinámica en la física clásica y cuál fue el resultado de esta lucha. Forzado a reconocer la incompatibilidad radical entre la evolución irreversible de la termodinámica y las leyes reversibles de la dinámica, Boltzmann eligió la fidelidad a la dinámica, y definió las evoluciones prohibidas por el segundo principio no como imposibles sino como solamente improbables. Bergson ratificó este fracaso. La física, afirmó, está hecha para negar el tiempo y reducir el devenir a la repetición de lo mismo.

Fracaso dramático para uno, punto de partida de una construcción metafísica para el otro, el físico y el filósofo coincidían en un punto: ambos pensaban que el juicio que creían adivinar en la física de su época era definitivo, que el modo de inteligibilidad propuesto por la dinámica clásica se mantendría incólume. El futuro inmediato pareció darles la razón puesto que, como ya hemos dicho, tanto la relatividad como la mecánica cuántica prolongaron la negación del tiempo que se derivaba de la dinámica clásica. Sin embargo, escuchemos la solemne declaración pronunciada recientemente por Sir James Lighthill entonces presidente de la *International Union of Theoretical and Applied Mechanics:* «Aquí, debo detenerme y hablar en nombre

de la gran hermandad de practicantes de la mecánica. Hoy somos muy conscientes de que el entusiasmo que animaba a nuestros predecesores debido al maravilloso logro de la mecánica newtoniana les llevó a generalizaciones en el dominio de la predecibilidad (...), que ahora sabemos falsas. Queremos presentar excusas colectivamente por haber inducido a error al público cultivado propagando, a propósito del determinismo de los sistemas que satisfacen las leyes newtonianas del movimiento, ideas que, a partir de 1960, se han revelado incorrectas»[1].

He aquí una declaración que podríamos calificar de demoledora. Los historiadores de la ciencia están acostumbrados a «revoluciones» en el curso de las cuales una teoría es vencida, abandonada, mientras que otra triunfa. ¡Pero es raro que los especialistas de una teoría reconozcan que durante tres siglos se han equivocado en cuanto al alcance y significación de su teoría! Y ciertamente, la renovación que desde hace algunas decenas de años conoce la más antigua de las ciencias es un acontecimiento único en la historia de la ciencia. El determinismo, que aparecía como consecuencia ineluctable de la inteligibilidad dinámica, se encuentra hoy reducido a una propiedad que solamente es válida en casos particulares. Desde ese momento, las probabilidades, de las que Boltzmann tuvo que servirse como un simple concepto auxiliar para traducir nuestra ignorancia contingente, adquieren una significación intrínseca. Y con las probabilidades resucita la cuestión de la entropía.

Volvamos al artículo de Lighthill. Ya hemos descrito en el capítulo precedente la divergencia *exponencial* de las trayectorias que refleja la existencia de un exponente de Lyapounov positivo. También hemos mencionado la idea de *horizonte temporal*, más allá del cual pierde sentido la descripción del comportamiento de un sistema caótico en términos de trayectorias individuales. Volveremos sobre estas ideas; lo importante ahora es señalar que se aplican ya a sistemas dinámicos tan *simples* como el péndulo esférico cuya evolución hacia el caos hemos descrito en el capítulo 4.

Este es un punto fundamental. En efecto, como Lighthill subraya, el hecho de que un comportamiento regular pueda

[1] J. Lighthill, «The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics», op. cit., p. 38.

hacerse «caótico» no es en sí mismo una novedad: basta pensar en la transición entre flujo laminar y flujo turbulento. Pero un fluido constituye un sistema muy complicado, formado por una inmensa población de moléculas en interacción y que, evidentemente, no podemos pensar en caracterizar en términos de trayectorias individuales. Del mismo modo, el modelo utilizado por Boltzmann para interpretar el segundo principio de la termodinámica suponía un gran número de partículas. En este caso, el modelo de inteligibilidad dinámica era invocado como válido de derecho pero, de hecho, el físico debía proceder por aproximación y podía, por ello, hacer de la irreversibilidad la consecuencia de las aproximaciones a las que se veía obligado.

Esta es la razón por la que el descubrimiento de sistemas dinámicos simples, susceptibles de tratamiento exacto, que puedan conducir a comportamientos caóticos es de fundamental importancia. De ahora en adelante ya no hay escapatoria posible. Hoy, el físico puede descifrar el mensaje de la entropía.

¿Por qué la entropía? ¡Qué profesor de física no se ha planteado esta pregunta! ¿Cómo responderla si, por otra parte, acaba de hablar de las leyes reversibles y deterministas que rigen el movimiento? ¿Es preciso entonces hablar de la entropía como si sólo fuese una magnitud construida con fines prácticos, útil a los ingenieros, que manifiesta no una búsqueda de inteligibilidad sino una preocupación de manipulación y explotación? Esta respuesta se hace tanto más difícil de aceptar hoy cuanto que la física de los fenómenos lejos del equilibrio ha demostrado el papel constructivo de los fenómenos irreversibles. En adelante podemos afirmar que el mensaje de la entropía no tiene por objeto los límites de nuestros conocimientos o los imperativos prácticos. Nos habla del mundo que habitamos y que describimos. Define las limitaciones intrínsecas a partir de las que se renuevan el sentido y alcance de las preguntas que dicho mundo nos autoriza a plantear.

Para precisar el contraste entre los modos de inteligibilidad de ayer y de hoy tomemos un sencillo ejemplo. Todos sabemos lo que significa «jugar a cara o cruz». En cada tirada nosotros no podemos adivinar de qué lado caerá la moneda pero en promedio caerá tantas veces de un lado como del otro. El lanzamiento de la moneda responde así a una ley probabilista: cada uno de sus posibles resultados se caracteriza por un probabilidad 1/2.

Pero, por otra parte, podemos considerar el movimiento de la moneda como sujeto a una ley determinista. En este caso, la probabilidad respondería solamente a nuestra ignorancia. La moneda sólo sería un instrumento de una «elección al azar» en la medida en que no tratáramos de precisar su trayectoria.

Consideremos más en detalle las condiciones iniciales y prescindamos de todo lo que pudiera complicar el movimiento como, por ejemplo, el rozamiento del aire. Simulemos el lanzamiento con ayuda de un ordenador que nos permitirá definir las condiciones iniciales mediante números con tantas cifras decimales como queramos. Dos casos pueden presentarse. Un incremento de la precisión podría suprimir la pertinencia de la ley probabilista: estaríamos entonces en condiciones de predecir que para una determinada condición inicial obtendremos cruz, y para btra obtendremos cara. Concluiremos así que la idea de probabilidad sólo provenía de nuestra ignorancia. La probabilidad —y así se la considera generalmente— no es más que un concepto auxiliar. Sin embargo, ahora ya sabemos que no es así necesariamente. Existen movimientos para los cuales, por mucho que precisemos las condiciones iniciales introduciendo más y más decimales, desde el momento que esta precisión es *finita* la ley probabilista sigue siendo válida. Tendremos siempre tantas probabilidades de sacar cara como de sacar cruz.

¿Cómo representarse este segundo caso? Tomemos un segmento de recta. Imaginemos que, sobre este segmento, cada punto racional corresponde a uno de los dos posibles resultados de un lanzamiento, y cada punto irracional al otro. Cualquiera que sea la precisión con la que nos situemos sobre la recta nunca podremos definir un punto sino únicamente un segmento, y este segmento, por pequeño que sea, incluirá puntos racionales y puntos irracionales. En efecto, cada punto racional está rodeado de irracionales y viceversa. Jamás podremos definir una condición inicial que genere de forma determinista uno de los dos resultados posibles. La ley probabilista permanece así como una ley fundamental mientras que la ley determinista deriva de una *idealización incorrecta.*

La distinción que introducimos entre estos dos usos de la idea de probabilidad, instrumento auxiliar o concepto fundamental, remite al problema ya planteado por Leibniz —lo hemos evocado en el capítulo 2— del paso al límite desde un conoci-

miento de precisión finita a un conocimiento de tipo divino, infinito, que no puede expresarse en palabras ni en cifras. Para que la noción de trayectoria determinista constituya un modo de representación adecuado es necesario que resista a lo que Pierre Duhem bautizó como el «margen de error físico» [2]. Como hemos visto, la descripción de los sistemas caóticos en términos de trayectorias no puede resistir al «margen de error»: cualquier imprecisión en la determinación inicial de tales sistemas se amplifica exponencialmente con el tiempo.

Analicemos con más detalle estos conceptos con un sencillo ejemplo: la ya clásica «transformación del panadero» [3].

Una transformación dinámica puede describirse como la transformación de un punto en otro punto dentro del espacio «de fases» del sistema estudiado. Cada posible estado dinámico de un sistema está representado, según el ideal de la dinámica clásica, por un punto en dicho espacio, y cada evolución temporal por una trayectoria. El espacio de fases de la transformación del panadero sólo tiene dos dimensiones: es un cuadrado de lado unidad.

He aquí la regla sencilla que define la transformación del panadero *(fig.10):* primero achatamos el cuadrado para obtener un rectángulo de base 2 y altura 1/2; a continuación, las dos mitades de este rectángulo se superponen para obtener un nuevo cuadrado. Esta transformación es reversible: la transformación inversa, que comprime el cuadrado en rectángulo de base 1/2 y de altura 2 antes de recomponer un nuevo cuadrado, llevaría de nuevo cada punto a su posición inicial.

Sin embargo, si reflexionamos sobre el resultado de una serie de transformaciones semejantes comprendemos que tenemos aquí un ejemplo de *sistema dinámico inestable,* sistema cuya descripción determinista no puede resistir a la condición del «margen de error físico».

En efecto, tomemos una región del espacio de fases; cualquiera que sea el tamaño de esta región, por pequeño que sea, acabará siempre por ser fragmentada por la operación de corte del rectángulo, y sus fragmentos sufrirán a su vez el mismo tipo

[2] P. Duhem, *La Théorie Physique. Son Objet. Sa structure,* reeditado en Vrin, París. 1981. 2.ª parte, capitulo III.

[3] Para más detalles véase *La nueva alianza, op. cit.,* Apéndice I.

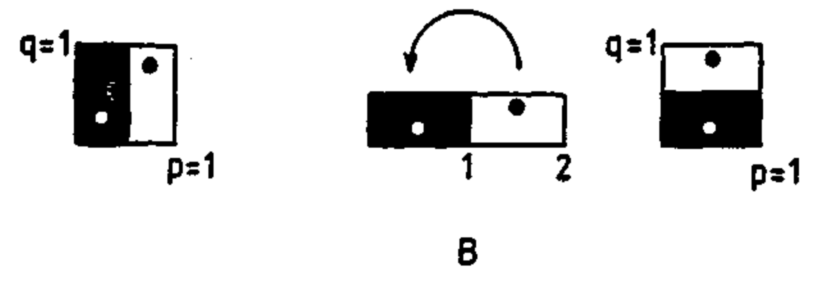


Figura 10.—*Transformación del panadero.*

de fragmentación. Lo que significa que dos puntos tan próximos como se quiera en el espacio de fases conocerán, finalmente, destinos divergentes.

• No es entonces sorprendente que la transformación del panadero nos permita calcular el valor del exponente de Lyapounov cuya existencia es, como hemos visto, la verdadera marca del comportamiento caótico.

En la transformación del panadero las dos coordenadas juegan papeles diferentes. La coordenada horizontal es la «coordenada dilatante»: en su dirección se produce la dilatación del cuadrado en rectángulo. La coordenada vertical es, por el contrario, «contractante»: en la dirección de esta coordenada los puntos se aproximan cuando se aplasta el cuadrado para dar un rectángulo.

En cada dilatación la distancia entre dos puntos según la coordenada dilatante se duplica. Tras n operaciones se habrá multiplicado por un factor 2^n, es decir, $e^{n\log 2}$. El número n de operaciones mide el tiempo. Entonces, el exponente de Lyapounov que caracteriza la transformación del panadero tiene el valor log2 (a la dirección contractante corresponde un exponente negativo del mismo valor).

La transformación del panadero define así un comportamiento caótico pero, a diferencia de los atractores que ya hemos descrito en el capítulo precedente, este comportamiento caracteriza un sistema sujeto a una ley de evolución temporal *reversible.*

Es interesante comprender desde este momento por qué las objeciones levantadas contra las ideas de Boltzmann pierden

toda pertinencia en cuanto consideramos un sistema suficientemente inestable.

Dos objeciones habían acarreado la derrota de Boltzmann: la del «retorno» y la de la «inversión». La primera invoca un teorema de Poincaré (el teorema «de recurrencia») según el cual todo sistema dinámico acabará siempre, después de un tiempo bastante largo (el tiempo «de Poincaré»), pasando tan cerca como queramos de su posición inicial. La segunda invoca un experimento mental: si invertimos las velocidades, el sistema recorrerá en sentido inverso la trayectoria que le ha llevado al estado en que se ha hecho la inversión. En ambos casos, la situación inicial no pertenece solamente a un pasado irreversiblemente desaparecido sino también a un posible futuro. La irreversibilidad sólo es así una apariencia. Los físicos han aceptado desde entonces el enunciado de Smoluchowski: «Si continuáramos nuestra observación durante un tiempo inmensurablemente largo, todos los procesos se mostrarían reversibles» [4].

Sin embargo, la existencia, para los sistemas «caóticos», de un horizonte temporal medido por el tiempo de Lyapounov (en este caso l/log2) resta todo valor a estas dos objeciones. El tiempo de Poincaré es mucho mayor que el tiempo de Lyapounov. Por ello nosotros ya no podremos describir una trayectoria que vuelve a su punto inicial: este retorno se sitúa más allá del horizonte temporal, en un instante en el que la noción de trayectoria individual hace tiempo que ha perdido su sentido. Por la misma razón, una inversión de velocidades no es ya concebible, ni siquiera como experimento mental, tras un tiempo de evolución grande comparado con el tiempo de Lyapounov. Los sistemas caóticos no pueden entonces ser definidos como reversibles para tiempos largos comparados con el tiempo de Lyapounov. Esta limitación fundamental está confirmada —como veremos más adelante en este mismo capítulo— mediante cálculos con ordenador. Estos cálculos utilizan un programa basado en un sistema de ecuaciones reversibles con el tiempo y muestran el carácter *irreversible* de la evolución definida por estas ecuaciones para tiempos suficientemente grandes.

[4] En *Vortrage über die kinetische Theorie der Materie und Elektrizilat*, 1914. Citado en H. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton, University Press, 1949, p. 204.

La transformación del panadero permite entender mejor esta situación. Para analizarla con más detalle necesitamos primero mostrar que esta transformación puede describirse en términos de *desplazamiento de Bernouilli*.

Para explicar esta noción comencemos por expresar en forma «binaria» el valor, comprendido entre O y 1, de las dos coordenadas que definen cada punto del espacio de fases de la transformación del panadero. Cada coordenada estará entonces representada por una serie de «decimales» (este término es evidentemente inapropiado) cuyo valor es O a 1.

Consideremos todos los puntos cuya coordenada horizontal se expresa en forma binaria por un número que comienaza por 0,01. El valor O del primer decimal implica que estos puntos pertenecen a la mitad izquierda del cuadrado (coordenadas comprendidas entre O y 0,5). El valor 1 del segundo decimal implica que pertenecen a la mitad derecha de la primera mitad (coordenadas comprendidas entre 0,25 y 0,5). Veamos ahora (véase *fig. U)* el efecto de la transformación del panadero sobre el conjunto de puntos definidos por esta coordenada. Todos estos puntos van a' encontrarse reunidos en el cuarto inferior derecho del espacio de fases. Este nuevo conjunto de puntos está definido por el valor 0,1 de su coordenada horizontal (estando indeterminados los decimales siguientes) *pero también* por el valor 0,0 de su coordenada vertical. Es fácil verificar que si hubiéramos partido de puntos definidos por una coordenada

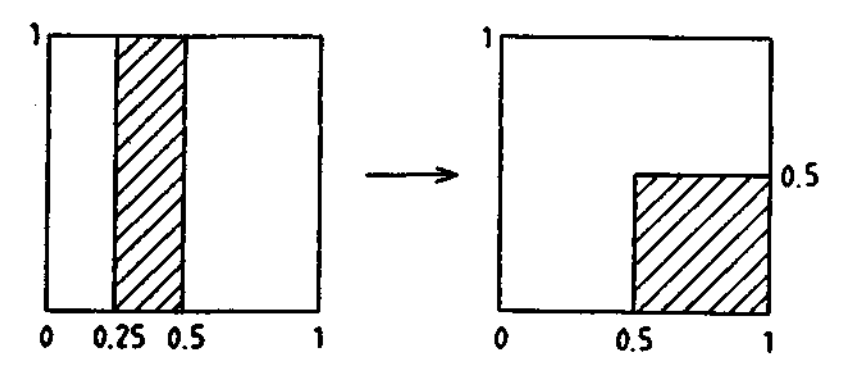


Figura 11.—*Transformación de la región definida por el valor 0.01 de la coordenada dilatante.*

horizontal de valor 0,11, el conjunto transformado habría estado definido por un valor 0,1 de la coordenada vertical. En otras palabras, el primer decimal de la coordenada horizontal (dilatante) se ha convertido en el primer decimal de la coordenada vertical (contractante).

La *figura 12* muestra el efecto de la transformación del panadero sobre el conjunto de puntos definidos por un valor de su coordenada vertical (contractante) igual a 0,01. Esta vez, la transformación da lugar a dos conjuntos que corresponden respectivamente a una coordenada vertical de valor 0,001 y a otra de valor 0,101. Para cada punto, el valor del primer decimal de la nueva coordenada contractante corresponde al que tenía el primer decimal de la coordenada dilatante.

Representemos ahora cada punto por la doble serie de decimales de sus dos coordenadas puestas una frente a otra: $\ldots u_{-3}u_{-2}u_{-1}\, u_0u_1u_2u_3\ldots$ (u_0 representa el primero de los decimales de la coordenada dilatante que corresponde a índices negativos). El lector podrá verificar sobre ejemplos sencillos, como los que preceden, que cada transformación del panadero puede representarse por un simple desplazamiento de los índices de la serie: los decimales «dilatantes» ascienden entonces un lugar (el segundo pasa a ser el primero), mientras que los decimales «contractantes» descienden un lugar (el primero pasa a ser el segundo). Tras una transformación, un decimal u_N de la nueva serie tiene el valor del decimal u_{N-1} de la serie de partida.

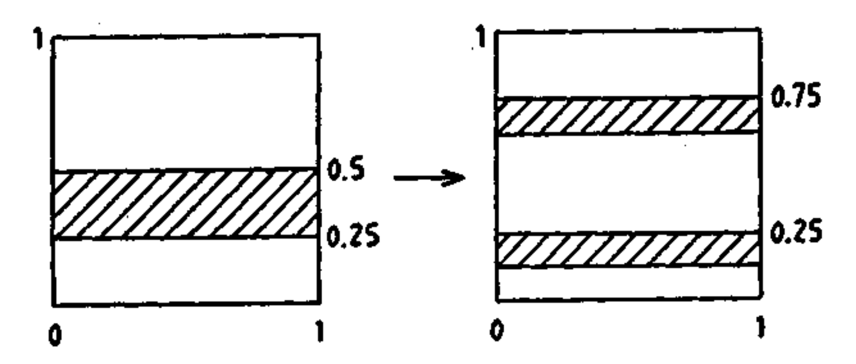


Figura 12.—*Transformación de la región definida por el valor 0,01 de la coordenada contractante.*

Comprendemos ahora el origen del término «desplazamiento de Bernouilli». Los trabajos de Bernouilli tenían por objeto los juegos de azar, en particular el juego de cara o cruz en el que cada tirada puede tener dos resultados con la misma probabilidad. Cada uno de estos resultados se define como independiente de los otros. También aquí, los decimales u_n pueden tener, con la misma probabilidad, dos valores y el valor de cada decimal es independiente de todos los demás como si se hubiera obtenido con un juego de cara o cruz.

La transformación del panadero, representada en términos de «desplazamiento de Bernouilli», nos proporciona inmediatamente un ejemplo de la íntima mezcla entre trayectorias cualitativamente diferentes a, la que habíamos hecho alusión a propósito del lanzamiento de una moneda. «Por doquier» en el espacio de las fases, encontramos puntos cuyas coordenadas en representación binaria corresponden a una serie periódica de O y 1 (es el caso de los números racionales). Estos puntos generarán trayectorias periódicas. Los otros puntos, que corresponden a series no periódicas, generarán trayectorias «ergódicas» que «cubrirán» todo el espacio de fases. Las trayectorias periódicas son entonces la excepción, como los números racionales.

Sin embargo, la transformación del panadero así representada nos muestra igualmente de modo inmediato por qué, en el caso de los sistemas caóticos de los cuales proporciona un ejemplo, las nociones de punto y de trayectoria determinista y reversible corresponden a una *idealización ilegítima:* para saber con qué tipo de trayectoria tratamos deberíamos describir nuestro sistema con una precisión infinita que corresponde a un número infinito de decimales.

Los físicos no pueden «darse» un punto sino que deben tener en cuenta en sus descripciones el hecho de que sólo pueden conocer sus sistemas mediante observación o preparación. Por ello nunca definirán un sistema por un punto sino por una región del espacio de las fases, es decir por una serie u_{-n}... u_{-1} $u_0 u_1$... u_n, caracterizada por un número finito n de decimales. El valor de n refleja la amplitud de la *ventana* que tenemos hacia el mundo.

Tomemos entonces la serie u_{-n}... u_{-1} $u_0 u_1$... u_n de la que sólo conocemos una ventana que corresponde a un valor n finito.

En la primera transformación los decimales más importantes

son evidentemente los decimales u_0 y u_{-1} que están llamados a convertirse, en la transformación siguiente, en los primeros decimales de cada una de las dos coordenadas. Pero tras esta primera transformación, el decimal desconocido u_{-n-1} ha venido a ocupar la posición u_{-n}. Una de las dos: o bien aceptamos que nuestra ventana se estrecha, lo que significa que nuestra descripción pierde precisión, o bien debemos, en este punto, hacer intervenir las probabilidades: la transformación puede tener dos resultados posibles, equiprobables.

En la siguiente transformación la precisión de nuestra descripción se reducirá aún más, o bien tendremos cuatro posibles equiprobables. Y así sucesivamente puesto que decimales de valor desconocido ascienden hacia u_0. Cuando un decimal desconocido haya alcanzado la posición u_0 el sistema tendrá las mismas probabilidades de estar representado por cualquier coordenada dilatante. Tras 2n + 1 transformaciones se encontrará *en cualquier parte* del espacio de las fases con la misma probabilidad. Esta vez la transformación inicial habrá desaparecido completamente.

Esta situación recuerda curiosamente a la que prevalece en el estudio de los fenómenos meteorológicos: detalles insignificantes que escapan a la observación pueden, en un futuro más o menos lejano, jugar un papel significativo. En los dos casos, y a diferencia del movimiento de la Tierra alrededor del Sol que podemos predecir sobre millones de años, encontraremos un límite intrínseco a la previsión: lo que hoy está oculto en el ruido de fondo de nuestras observaciones podrá mañana jugar un papel crucial. Por supuesto que el tiempo meteorológico no tiene la regularidad del desplazamiento de Bernouilli: en su caso ni siquiera podemos definir el tipo de información que escapa a nuestra «ventana» —puede ser el batir de un ala de mariposa en alguna parte de la cuenca amazónica o el estornudo de un habitante de Madagascar.

En 1927 Heisenberg había ya hecho notar que el problema que plantea la ley de causalidad (que está en la base del determinismo) no es tanto la existencia de una ley por la que el futuro podría ser determinado a partir del presente, como su premisa, la propia definición de este «presente». Esta observación adquiere aquí todo su sentido: la «ley» de evolución del panadero es de una simplicidad extrema pero implica, por ser ley

de una trayectoria individual, un modo de definición del presente despojado de sentido físico.

El determinismo reflejaba, como ha recordado Lighthill, las certidumbres que han alimentado a los descendientes de Newton, Laplace y Lagrange, justamente orgullosos de la ciencia de la que eran herederos. Hoy día el sentido de nuestro saber ha cambiado. Quizá podamos recordar aquí al héroe de *El nombre de la rosa* de Umberto Eco, Guillermo de Baskerville, para quien descifrar el mundo tenía algo de historia policíaca: juego intelectual en el que sólo tenemos indicios pero nunca la totalidad de los elementos.

Hasta aquí hemos subrayado sobre todo las dimensiones negativas del caos dinámico, la necesidad que implica de abandonar las nociones de trayectoria y de determinismo. Pero el estudio de los sistemas caóticos es también una apertura que crea la necesidad de construir nuevos conceptos, nuevos lenguajes teóricos (véase el Apéndice I). El lenguaje clásico de la dinámica implica las nociones de puntos y trayectorias y, hasta el momento, nosotros mismos hemos recurrido a ellas mientras mostrábamos la idealización —en este caso ilegítima— de la que proceden. Ahora se trata de transformar este lenguaje de modo que integre de manera rigurosa y coherente las limitaciones que acabamos de reconocer.

En efecto, no basta expresar el carácter finito de la definición de un sistema dinámico describiendo el estado inicial de este sistema por una región en el espacio de las fases, y no por un punto, pues tal región, sujeta a la evolución que define la dinámica clásica, por más que se fragmente en el curso del tiempo *conservará su volumen* en el espacio de las fases. Esto es lo que expresa un teorema general de la dinámica, el *teorema de Liouville*. Todas las tentativas de construir una función entropía que describa la evolución de un conjunto de trayectorias en el espacio de las fases han tropezado con el teorema de Liouville, con el hecho de que la evolución de un conjunto semejante no puede describirse mediante una función que crezca con el tiempo [5].

Ahora bien, un argumento sencillo permite mostrar que la

[5] Véase *La nueva alianza, op. cit.*, capítulo IX.

incompatibilidad, en el caso de un sistema caótico como el que define la transformación del panadero, entre el teorema de Liouville y la condición según la cual cualquier descripción corresponde a una «ventana». La existencia de esta ventana define el «poder de resolución» de nuestras descripciones: existirá siempre una distancia r tal que no podremos distinguir entre dos puntos separados uno de otro una distancia menor que r según la dirección vertical. Sigamos ahora la evolución de una región del espacio de las fases que contiene todos los puntos representativos del sistema. En cada transformación, esta región se contraerá según la dirección vertical, pero cuando alcance el valor mínimo r ya no podremos seguir su contracción y tendremos que definirla como constante (ver *fig. 13).* Aunque el teorema de Liouville definía la superficie de esta región como constante en el curso del tiempo, ella invadirá la totalidad del espacio de las fases.

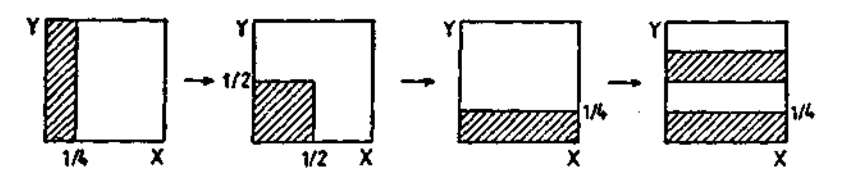


Figura 13.—*Evolución de una región del espacio de fases cuando se tiene en cuenta la distancia r por debajo de la cual no podemos discriminar entre dos puntos vecinos según la dirección vertical. Aquí se ha fijado el valor r = 1/4.*

Así pues no basta abandonar la representación de un sistema dinámico mediante un punto en el espacio de las fases. Es necesario construir un *lenguaje nuevo,* una nueva definición del estado de un sistema y de su evolución que no presuponga ya la noción de punto ni la posibilidad que ella implica de atribuir a todo sistema una trayectoria bien definida.

La nueva representación dinámica introducida en los últimos años [6] da cuenta, en la definición del estado instantáneo, de la

[6] Para más detalles sobre esta transformación introducida aquí con motivo de la transformación del panadero, y que se encontrará en las páginas siguientes acerca de los sistemas caóticos «hamiltonianos», véase B. Misra y I. Prigogine.

distinción entre dimensiones contractantes y dilatantes que caracteriza los sistemas caóticos.

Es fácil constatar que la transformación del panadero permite definir objetos que la transformación no «conserva», en el sentido en que ella conserva las superficies: estos objetos son las «fibras dilatantes» y las «fibras contractantes». Mientras que cualquier punto se transforma en otro punto por la transformación del panadero, las fibras dilatantes se multiplican por dos en cada transformación, y las fibras contractantes pierden la mitad de su longitud (*fig.14*). Estas fibras se caracterizan así por dos

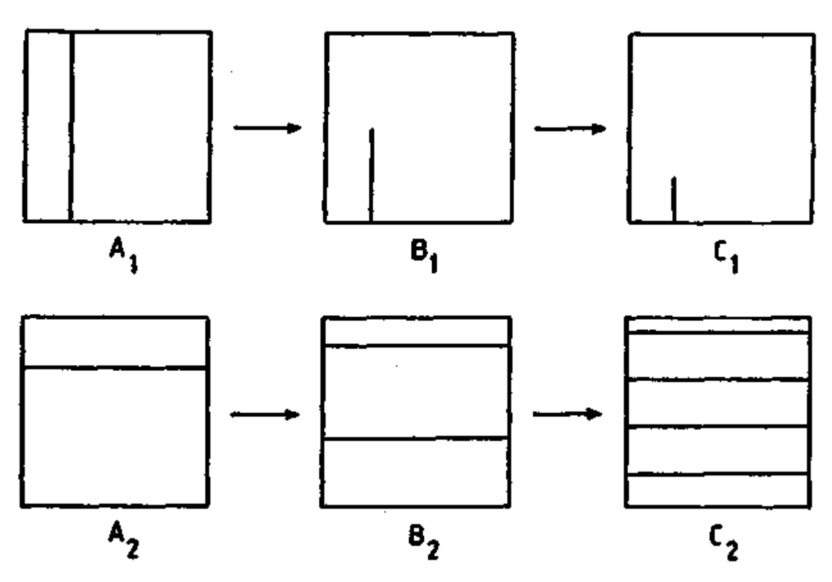


Figura 14.—*Evolución de una fibra contractante* (A_1, B_1, C_1) *y de una fibra dilatante* (A_2, B_2, C_2).

«On the Foundations of Kinetic Theory», en *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, vol. 69, 1980, pp. 101-110; S. Goldstein, B. Misra y M. Courbage, «On Intrinsic Randomness of Dynamical Systems», en *J. Stat. Phys.*, vol. 25, 1981, pp. 111-126; B. Misra e I. Progogine, «Irreversibility and Non-Locality», en *Lect. Math. Phys.*, vol. 7, 1983, pp. 421-429; M. Courbage, «Intrinsic Irreversibility of Kolmogorov Dynamical Systems», en *Physica*, vol. 122 A, 1983, pp. 459-482; Y. Elskens e I. Prigogine, «From Instability to Irreversibility», en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 83, 1986, pp. 5756-5760; I. Prigogine y Y. Elskens, «Irreversibility, Stochasticity and Non-Locality in Classical Dynamics», en *Quantum Implications. Essays in Honour of David Bohm*, Londres, Rutledge and Kegan Paul, 1986, pp. 205-223.

tipos diferentes de futuro: todos los puntos pertenecientes a una fibra contractante convergen hacia el mismo futuro, mientras que los puntos pertenecientes a una fibra dilatante cubrirán densamente *, en el futuro, la totalidad del espacio de las fases.

Tornemos un fragmento de fibra contractante. Los diferentes sistemas que representan tienen, por definición, un futuro común. Todos los puntos de tal fragmento convergen. Si este fragmento corresponde a nuestro poder de resolución finito r, él define un conjunto de sistemas indiscernibles *y que permanecerán indiscernibles en todo el futuro.*

La nueva descripción de los sistemas dinámicos caóticos sustituye el punto por un conjunto que corresponde a un fragmento de fibra contractante. Se trata así de una descripción *no local,* que tiene en cuenta la condición de indiscernibilidad que hemos definido. Pero esta descripción no es relativa a nuestra ignorancia. Ella da un sentido intrínseco al carácter finito de nuestras descripciones: en el caso en que el sistema dinámico no sea caótico, cuando el exponente de Lyapounov es nulo, reencontramos la representación clásica, puntual, y los límites puestos a la precisión de nuestras medidas ya no afectan a la representación del sistema dinámico.

Esta nueva representación *rompe asimismo la simetría temporal.* En efecto, a priori eran posibles dos elecciones correspondientes a dos diferentes descripciones. La representación de un sistema que sustituyera un punto por un fragmento de fibra dilatante definiría la dirección del tiempo como aquélla en que los puntos de una fibra *dilatante* se hacen indiscernibles. Consiguientemente, allí donde una sola ecuación de evolución permitía calcular la evolución hacia el pasado o hacia el futuro de puntos en sí mismos indiferentes a esta distinción, tenemos ahora dos ecuaciones de evolución diferentes. Una describiría la evolución de un sistema hacia un equilibrio situado en el futuro, la otra describiría la evolución de un sistema hacia un equilibrio situado en el pasado.

Uno de los grandes problemas de la interpretación probabilista de la evolución hacia el equilibrio era que la representación

* Se dice que un conjunto A es denso en B cuando en el entorno de cualquier punto de B existen puntos de A. En nuestro caso esto se traduce en que en cualquier región, por pequeña que sea, del espacio de las fases encontraremos finalmente puntos de la fibra dilatante original. [N. del T.]

probabilista no da sentido a la distinción entre pasado y futuro: de un estado caracterizado por una distribución de probabilidad dada se podía decir que evolucionaría hacia el equilibrio en el futuro, pero se podia decir igualmente, a partir de los mismos argumentos, que provenía de un estado de equilibrio situado en el pasado. Esta es la situación que condujo a Boltzmann, como hemos visto en el primer capítulo, a asimilar nuestro Universo a una fluctuación surgida espontáneamente a partir de un estado de equilibrio y regresando poco a poco hacia el equilibrio.

La nueva descripción dinámica que hemos construido incorpora, en cambio, la flecha del tiempo simultáneamente en la definición de sus unidades (los fragmentos de fibra contractante) y en la de ecuación que rige su evolución. Las ecuaciones de evolución dinámica adquieren así el mismo tipo de simetría que las ecuaciones de evolución que describen los sistemas disipativos. Por ejemplo, la ley de difusión del calor describe la evolución de un sistema hacia el estado de equilibrio térmico, y no la evolución inversa en el curso de la cual el sistema se alejaría espontáneamente del estado de equilibrio.

El principio de razón suficiente unía indisolublemente la definición local de un sistema —la causa *plena* y el efecto *total*— y la *simetría* del tiempo —la relación de *equivalencia* reversible que articula causa y efecto. La reversibilidad prueba que nada ha escapado a la definición, que ésta determina completamente la evolución. El objeto dinámico sometido al principio de razón suficiente podía aparecer entonces cómo perfectamente inteligible, como respondiendo a categorías que no deben nada al punto de vista humano. Y, consiguientemente, cualquier tentativa de dar un sentido a la irreversibilidad en un lenguaje sujeto a la razón suficiente estaba condenada a presentarla como la consecuencia de una definición aproximada, relativa al punto de vista humano y no al objeto. Pero los comportamientos dinámicos caóticos permiten construir el puente, que Boltzmann no había podido crear, entre la dinámica y el mundo de los procesos irreversibles. La nueva representación del objeto dinámico, no local y con simetría temporal rota, *no es* una descripción aproximada o más pobre que la representación clásica. Ella define, por el contrario, esta representación clásica como *relativa* a un caso particular. Los límites de validez del principio de razón

suficiente no están ligados a los del sujeto que observa sino a las propiedades intrínsecas del objeto observado.

La transformación del panadero es un modelo de sistema dinámico caótico (lo que técnicamente se llama un sistema «de K-flujos», donde K recuerda el nombre del gran matemático Kolmogoroff). Tales sistemas se sitúan evidentemente en las antípodas de los sistemas dinámicos que dieron base al ideal determinista. Hoy sabemos que estos últimos, que tanto tiempo dominaron la imaginación de los físicos, constituyen de hecho una clase muy particular. La idea de comportamiento dinámico homogéneo, concebido siguiendo el modelo del péndulo o de la trayectoria planetaria, ha sido sustituida por la exploración de comportamientos diferenciados, de los que los sistemas deterministas y los sistemas caóticos constituyen los dos extremos.

Fue en 1892, con el descubrimiento de un teorema fundamental debido a Poincaré [7], cuando se rompió la imagen homogénea del comportamiento dinámico: la mayoría de los sistemas dinámicos, comenzando por el simple sistema «de tres cuerpos», *no son integrables.*

¿Qué significa este enunciado? Desde los trabajos de Hamilton sabemos que un mismo sistema dinámico puede representarse de diferentes formas equivalentes por una transformación canónica (o unitaria, el primer término se utiliza normalmente en mecánica clásica y el segundo en mecánica cuántica; nosotros no haremos esta distinción) de la definición de los pares de variables independientes que permiten describirlo: las posiciones (q) y los momentos (o cantidades de movimiento) (p). Una transformación canónica conserva la forma hamiltoniana de la descripción: la energía del sistema, expresada en términos de las variables que resultan de una transformación semejante, es siempre el *hamiltoniano* del sistema, la magnitud que determina su evolución temporal.

Entre todas las transformaciones unitarias existe una que permite llegar a una representación privilegiada del sistema: aquélla que hace de la energía, es decir del hamiltoniano, una función únicamente de los momentos y ya no de las posiciones. En tal representación los movimientos de las diferentes partícu-

[7] Véase también, sobre este tema, I. Ekeland, *Le calcul el l'Imprévu*, París, Seuil, 1984.

las del sistema se describen como si ya no dependiesen de las posiciones relativas de las partículas, es decir, como si éstas ya no estuviesen en interacción: las interacciones han quedado «absorbidas» en la definición de las variables p y q. Los movimientos posibles de tales sistemas tienen entonces la simplicidad de los movimientos libres.

Las variables que corresponden a esta representación se denominan variables «cíclicas» pues permiten explicitar el carácter *periódico* del comportamiento dinámico. Estas variables comprenden, como siempre, las coordenadas y los momentos. Las coordenadas, llamadas variables «de ángulo» o variables «angulares», varían, como para cualquier sistema sin interacción, de manera lineal con el tiempo. Esta variación está determinada por las frecuencias w características del sistema integrable. Los momentos se llaman variables «de acción» y son *invariantes* del movimiento dinámico. Todos los sistemas integrables pueden describirse en términos de variables de ángulo y de acción.

Ahora bien, en 1892 Poincaré demostró que es imposible, en general, definir la transformación unitaria que convertiría las «acciones» en invariantes del sistema. La mayoría de los sistemas dinámicos no admiten otros invariantes que la energía y la cantidad de movimiento totales y, por ello, no son integrables.

La razón de la imposibilidad de definir los invariantes del movimiento que corresponden a la representación de un sistema dinámico integrable reside en un mecanismo de *resonancia.* Todos estamos familiarizados con los fenómenos de resonancia. Tomemos un resorte: cuando lo apartamos de su posición de equilibrio vibra con una frecuencia característica, su frecuencia propia. Sometamos este resorte a una fuerza externa caracterizada asimismo por una frecuencia que podemos hacer variar. En el momento en que las dos frecuencias, la del resorte y la de la fuerza externa, se encuentran en una relación simple (es decir, una de las frecuencias es igual a la otra, o también, por ejemplo, 2, 3, 4... veces mayor), vemos que la amplitud de vibración del resorte crece drásticamente. Análogamente, todos sabemos que si se le da a un columpio impulsos que corresponden a su período, el movimiento del columpio adquiere una amplitud muy grande. El fenómeno de resonancia puede ser caracterizado entonces como una transferencia de energía entre dos movimien-

tos periódicos acoplados cuyas frecuencias están en relación simple.

Son estos fenómenos de resonancia —pero, esta vez, entre los diferentes grados de libertad que caracterizan un mismo sistema dinámico— los que impiden que este sistema pueda ponerse en forma integrable. La resonancia más simple entre las frecuencias w_1, w_2..., w_n se produce cuando estas frecuencias son iguales, pero también se produce cada vez que las frecuencias son conmensurables, es decir, cada vez que guardan entre ellas una relación racional (si existe un conjunto de número enteros no todos nulos k_1, ... k_n tal que $k_1w_1 + k_2w_2 + \ldots + k_nw_n = 0$). El problema se complica por el hecho de que, en general (y contrariamente al caso particular del oscilador armónico), las frecuencias no son constantes sino que dependen de las variables de acción y, por lo tanto, toman valores diferentes en cada punto del espacio de las fases. Esto implica que en el espacio de las fases de un sistema dinámico habrá puntos caracterizados por una resonancia mientras que otros no lo estarán. La existencia de puntos de resonancia prohibe, en general, la representación en términos de variables cíclicas, es decir una descomposición del movimiento en movimientos periódicos independientes.

Los puntos de resonancia, es decir, los puntos en los que las frecuencias guardan una relación racional, son «raros», como raros son los números racionales respecto a los irracionales. Por ello, «casi por doquier» en el espacio de las fases tendremos comportamientos periódicos del tipo habitual. Sin embargo, los puntos de resonancia existen en cualquier volumen finito del espacio de las fases. De ahí el carácter terriblemente complicado de la imagen de los sistemas dinámicos que nos ha revelado la dinámica moderna iniciada por Poincaré y continuada por los trabajos de Kolmogoroff, Arnold y Moser[8].

Si los sistemas dinámicos fueran integrables, la dinámica sólo podría proporcionarnos una imagen estática del mundo, imagen de la que el movimiento del péndulo o del planeta en su trayectoria kepleriana constituiría el prototipo. Sin embargo, la existencia de resonancias en los sistemas dinámicos de más de

dos cuerpos no basta para transformar esta imagen y hacerla coherente con los procesos evolutivos que hemos estudiado en los capítulos precedentes. Como hemos dicho, cuando el volumen es pequeño son siempre los comportamientos periódicos los que dominan. Hay una gran diferencia con la transformación del panadero donde, como hemos visto, las trayectorias periódicas son la excepción.

Sin embargo, para los sistemas «grandes» (cuyo volumen tiende a infinito) ¡a situación se invierte. Las resonancias se acumulan por doquier en el espacio de las fases; ahora tienen lugar no ya en cualquier punto racional sino en cualquier punto real (en términos técnicos se pasa de una serie de Fourier a una integral de Fourier). Por ello, los comportamientos no periódicos dominan, como sucede en los sistemas caóticos.

Ciertamente los físicos conocían «sistemas grandes» con comportamiento reproducible y perfectamente controlable. Es el caso, por ejemplo, de un superconductor o de un cristal grande. Sin embargo, tales sistemas constituyen la excepción. La menor impureza transforma cualitativamente el comportamiento del cristal. Como vamos a ver, el sistema grande tipo es el que fue objeto de la teoría cinética de Boltzmann: una población de partículas susceptibles de entrar en *colisión* unas con otras.

Llegamos aquí a una curiosa convergencia entre Boltzmann y Poincaré, entre aquél que había querido interpretar el segundo principio en términos de leyes dinámicas reversibles y aquél que había condenado la empresa como imposible a priori. En efecto, las colisiones como mecanismo de evolución corresponden muy precisamente a fenómenos de resonancia. Una colisión entre dos partículas puede ser asimilada a una transferencia de energía entre estas dos partículas. El choque entre dos partículas, con velocidades v_1 y v_2, conserva la energía y cantidad de movimiento totales pero confiere a las partículas nuevas velocidades v_1' y v_2'.

Hemos dicho que la existencia de resonancias hace imposible la transformación unitaria que debería conducir a la definición de las acciones J como invariantes del sistema, es decir, a permitir pasar de la forma general del hamiltoniano H(p,q) a su forma privilegiada H(J). Sin embargo, en el caso de los sistemas dinámicos grandes, caracterizados por un conjunto continuo de resonancias, es posible otra transformación que no encuentra el

obstáculo de las divergencias que hacen imposible la transformación unitaria y, por lo tanto, puede definirse como una generalización de ésta. Esta transformación no unitaria es del mismo tipo que la que nos ha permitido romper la simetría temporal de la descripción de los sistemas dinámicos caóticos. Ella define aquí *el paso de una descripción dinámica a una descripción de tipo cinético, y* enlaza así con el mundo de los procesos termodinámicos (véase también el apéndice II).

En el caso de un sistema de esferas duras en colisión, Sinaï ha podido demostrar la identidad entre comportamiento cinético y caótico, y definir la relación entre una magnitud cinética, como es el tiempo de relajación (tiempo medio entre dos colisiones), y el tiempo de Lyapounov que caracteriza el horizonte temporal de los sistemas caóticos.

La descripción cinética con simetría temporal rota aparece entonces, como veremos más en adelante, no como una forma aproximada de teoría dinámica sino como una descripción tan rigurosa como la descripción dinámica clásica en términos de trayectorias deterministas y reversibles. Lejos de poder ser jerarquizados, estos dos modos de representación caracterizan los dos extremos del espectro de comportamientos dinámicos cualitativamente diferenciados.

Analicemos con más detalle el suceso de «colisión» que permite articular dinámica y teoría cinética.

A primera vista, una colisión parece reversible: por cada colisión que transforma las velocidades v_1, v_2 de dos partículas en velocidades v_1', v_2', existe una colisión inversa que transforma las velocidades v_1' y v_2' en v_1 y v_2 (ver *fig. 15*). ¿Cómo se puede entender entonces que las colisiones puedan ser el mecanismo de una evolución irreversible hacia el equilibrio?

Experimentos de simulación numérica (ver *fig. 16)* han permitido visualizar el comportamiento de la función $\mathcal{H}$ que había construido Boltzmann a partir de la función de distribución de velocidades f (esta función $\mathcal{H}$ es la integral $\int f \lg f \, dv$ extendida a las velocidades de las partículas). Vemos que esta función tiene, como Boltzmann lo había predicho, un comportamiento dirigido en el tiempo. A partir de las ecuaciones dinámicas, simétricas respecto del tiempo, la simulación calcula el movimiento de un conjunto de «discos duros» sobre una superficie bidimensional con condiciones de contorno periódicas (esta



v_1 v_2 antes de colisión

v'_1 v'_2 después de colisión

v'_2 v'_1 antes de colisión

v_2 v_1 después de colisión

Figura 15.—*Colisión y colisión inversa.*

superficie es un «toro»). En el instante inicial la distribución de velocidades es aleatoria aunque corresponde a una situación alejada del equilibrio. La función decrece monótonamente hacia un valor constante que caracteriza el estado de equilibrio del sistema. En el equilibrio las colisiones ya no modifican, salvo fluctuaciones, la distribución de velocidades.

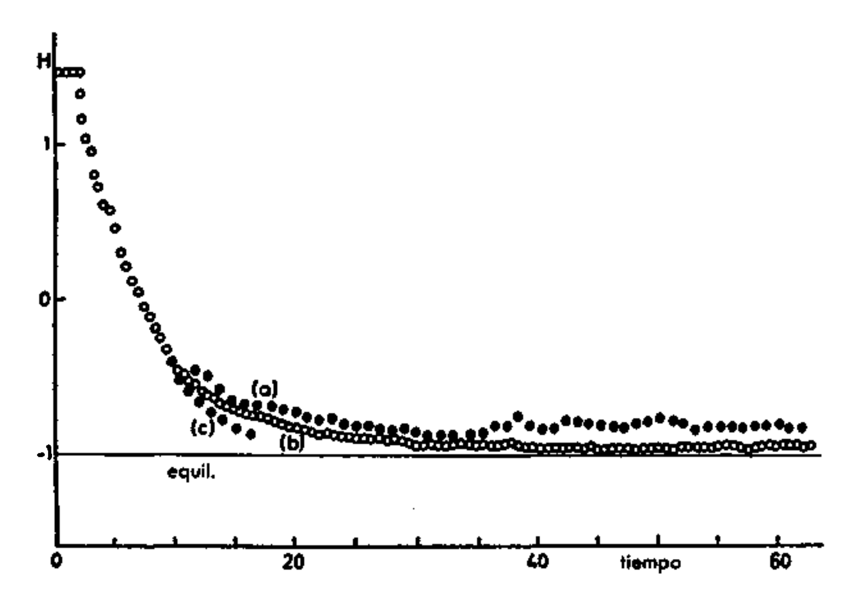


Figura 16.—*Simulación numérica del decrecimiento monótono de la función H de Boltzmann con el tiempo*[9].

¿Cómo entender esta «flecha del tiempo»? Dada la brevedad del tiempo de simulación no es sorprendente que no observemos «retorno» del sistema hacia su estado inicial, pero, ¿por qué se produce la evolución siempre en el mismo sentido, hacia el equilibrio situado en *nuestro* futuro?

Boltzmann había tratado de demostrar que, mientras el sistema no esté en el equilibrio, las colisiones que hacen evolucionar la función de distribución de velocidades hacia su valor de equilibrio son estadísticamente más frecuentes que las colisiones que lo alejan de él. Sin embargo —ya hemos hecho alusión en el primer capítulo— la objeción de Loschmidt pone de manifiesto la debilidad de este argumento. La inversión de velocidades proporciona los medios de hacer corresponder a todo estado inicial «boltzmanniano», que determina una evolución que conduce hacia el equilibrio, otro estado inicial que determina la

A. Bellemans y J. Orban, en *Physics Letters*, vol. 24 A, 1967, p. 620.

evolución inversa. En otras palabras, las probabilidades no permiten explicar la flecha del tiempo.

El propio Boltzmann tuvo que concluir que la validez de su descripción cinética depende de una condición que afecta al estado inicial del sistema. Esta condición es el «caos molecular». Cuando, como es el caso de la simulación numérica que acabamos de describir, las posiciones y velocidades iniciáles de las diferentes partículas son asignadas de manera aleatoria, el caos molecular se halla realizado. En cambio, cuando el estado inicial del sistema se obtiene mediante inversión de las velocidades, las posiciones y velocidades iniciales de las partículas ya no son independientes unas dé otras: la inversión de velocidades crea «correlaciones» entre éstas partículas. Por esta razón, la evolución de un sistema preparado de esta forma escapa al razonamiento estadístico de Boltzmann y puede conducir al sistema a alejarse del equilibrio termodinámico. Sin embargo, Boltzmann no pudo nunca justificar de manera satisfactoria la diferencia intrínseca entre «caos molecular» y estado correlacionado [10].

Volvamos al experimento de simulación numérica que nos permitirá efectuar lo que. en la época de Boltzmann, sólo podía ser un experimento mental: la inversión de velocidades (ver *fig. 17).* Tras un cierto número de colisiones se invierten las velocidades de las partículas y podemos constatar que, en efecto, el valor de $\mathcal{H}$ aumenta en lugar de disminuir. Aparentemente la objeción de Loschmidt está justificada: el comportamiento de esta función se debe únicamente al carácter particular del estado inicial del sistema.

Sin embargo, si examinamos la figura con mayor atención, podremos observar que, a pesar de todo, la flecha del tiempo domina. En efecto, la inversión de velocidades sólo tiene un efecto transitorio. Por otra parte, si la inversión de velocidades tiene lugar no ya tras 50, sino tras 100 colisiones, la función $\mathcal{H}$ no recuperará su valor inicial sino un valor más bajo. Desde luego, con un ordenador más potente y calculando con más cifras decimales, habríamos podido reducir la diferencia. Sin embargo, el problema se volvería a plantear tras 150 ó 200 colisiones... Cualquiera que sea la información de que disponga-

[10] T. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912,* Oxford, Clarendon Press, 1978. Edición española: *La teoria del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912* Alianza Editorial, Madrid. 1980.

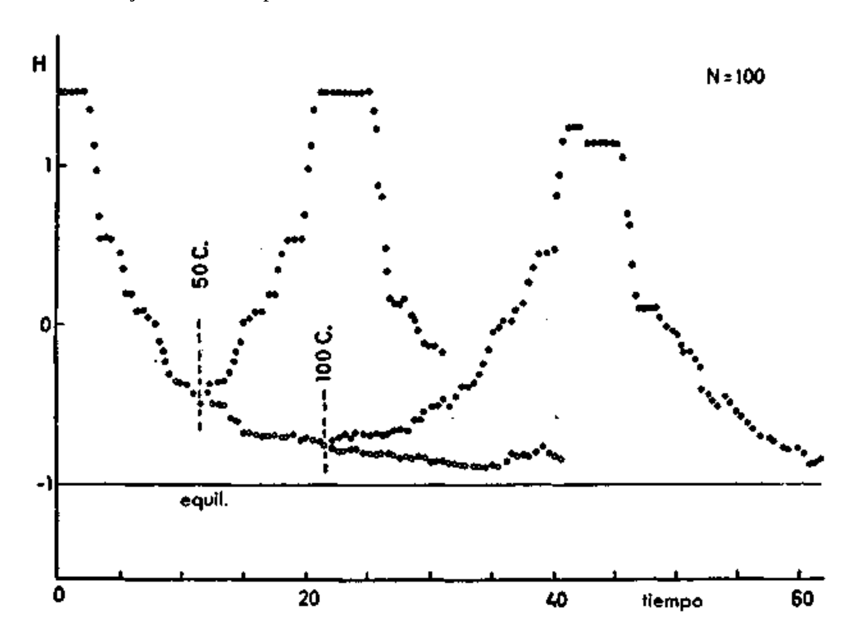


Figura 17.—*Simulación numérica*[9] *de un experimento de inversión de velocidades (50 C. y 100 C. indican que la inversión se ha efectuado tras 50 ó 100 colisiones).*

mos, no podremos anular la evolución cualitativa entre evolución boltzmanniana y su inversa: cuanto más numerosas hayan sido las colisiones antes de la inversión de velocidades, más difícil es «preparar» un sistema que remonte la pendiente entrópica y recupere su estado inicial. Hay que concluir, entonces, que contrariamente a la tesis clásica expresada por Smoluchowski —según la cual, para tiempos largos, la evolución de un sistema semejante aparecería como reversible—, para tiempos largos comparados con el tiempo que separa dos colisiones es la flecha del tiempo la que domina la evolución del sistema.

Tenemos ya los medios para comprender de manera cualitativa este dominio de la flecha del tiempo. Si bien los estados que generan una evolución anti-boltzmanniana son tan numerosos como los otros, no les son equivalentes. Cualquier imprecisión en la definición de un estado inicial «anti-boltzmanniano» basta de hecho para restablecer el dominio de la flecha del tiempo. La diferencia entre los dos tipos de estado no puede entonces ser

definida en términos de probabilidad, sino en términos de inestabilidad y de horizonte temporal. Para tiempos largos comparados con el tiempo de Lyapounov, *es imposible preparar*, mediante la inversión de velocidades, *un estado que escape a la flecha del tiempo*, cualquiera que sea la precisión de nuestras manipulaciones o de nuestros cálculos numéricos. Más allá del horizonte temporal del sistema, la información necesaria para semejante preparación está perdida irreversiblemente.

Analicemos ahora con más detalle la colisión a fin de definir la diferencia intrínseca entre las colisiones que se producen en un sistema en estado de «caos molecular», es decir entre partículas definidas como independientes unas de otras, y las que se producen entre partículas correlacionadas.

La descripción cinética de Boltzmann era aproximada, vulnerable. frente a la objeción de Loschmidt, porque sólo tenía en cuenta los cambios de velocidad que resultan de la colisión y que acercan la distribución de velocidades a la distribución de equilibrio. Ahora bien, las colisiones no tienen por único efecto modificar la distribución de velocidades de las partículas del sistema sino que también crean *correlaciones* entre estas partículas (ver *fig. 18)*. La inversión de velocidades transforma estas correlaciones post-colisionales en correlaciones precolisionales (ver *fig. 19*). La diferencia entre las colisiones que implican evolución hacia el equilibrio y las que lo alejan de él puede definirse entonces mediante el orden temporal entre colisiones y correlaciones. En el primer caso, la colisión crea correlaciones entre partículas independientes y hace más «desordenadas» sus velocidades. En el segundo, las correlaciones pre-colisionales se destruyen pero la distribución de velocidades se aleja de su valor de equilibrio.

Esta diferencia no tiene evidentemente ningún significado cuando el sistema tiene un comportamiento periódico. Por ejemplo, en el caso en el que un sistema estuviera formado por dos partículas que recotaran periódicamente una contra otra sería imposible distinguir entre correlaciones pre y post-colisionales. Cada colisión destruiría o recrearía alternativamente correlaciones entre las dos partículas. Consiguientemente, ni la flecha del tiempo ni el estado de equilibrio podrían ser definidos. En cambio, en los sistemas grandes con comportamiento caótico, la dinámica de las correlaciones post-colisionales nos permite

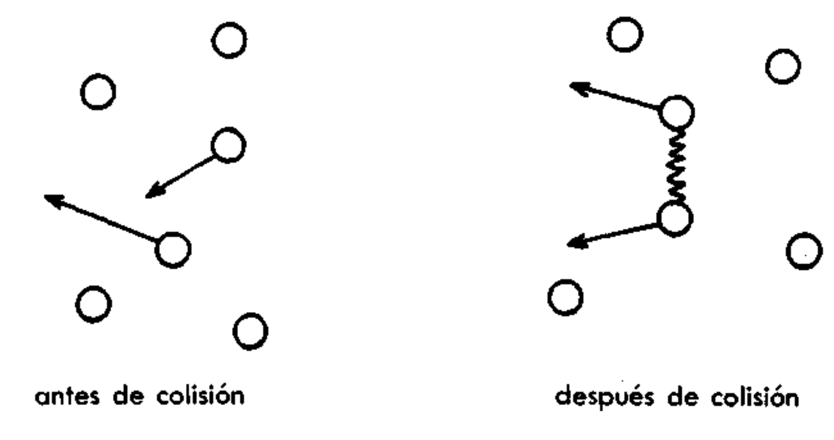


Figura 18.—*Creación de correlaciones. Inicialmente las partículas no están correlacionadas. La colisión entre dos partículas crea entre ellas correlaciones post-colisionales (indicadas por las líneas onduladas).*

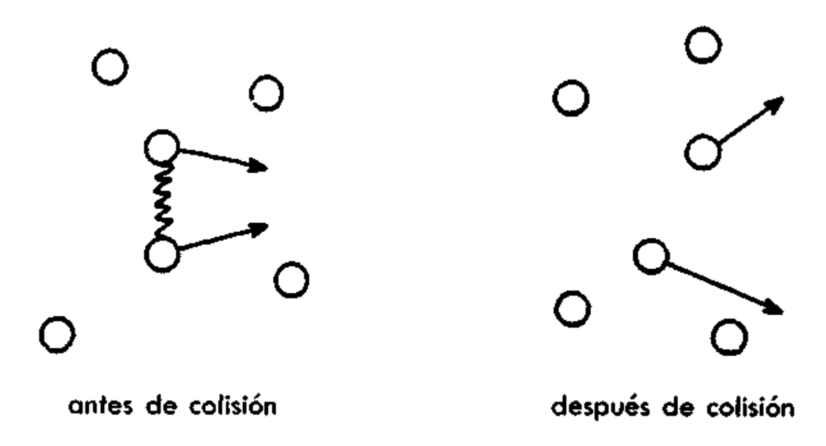


Figura 19.—*Destrucción de correlaciones tras una inversión de velocidades: la colisión destruye las correlaciones precolisionales creadas por la colisión representada en la figura precedente.*

interpretar el dominio de la flecha del tiempo que las simulaciones numéricas nos han permitido constatar.

Para un tiempo largo comparado con el tiempo de Lyapounov, las correlaciones creadas por las colisiones escapan a todo control concebible. En efecto, las correlaciones creadas entre dos partículas que han entrado en colisión van a amortiguarse rápidamente a medida que estas partículas encuentren otras que encontrarán otras, etc. La evolución de un sistema, de colisión en colisión, determina así *un flujo de correlaciones*, la creación de correlaciones que implican un número siempre creciente de grados de libertad. Las correlaciones post-colisionales están entonces condenadas a reunir, al cabo de un tiempo largo comparado con el tiempo de Lyapounov, un «mar» de correlaciones infinitamente múltiples e incoherentes [11].

Boltzmann se había visto obligado a reconocer que la función H que había construido no tenía en cuenta las correlaciones, y que la validez de su teorema dependía de hecho de argumentos estadísticos que suponían el caos molecular, la ausencia de correlaciones pre-colisionales. La dinámica de las correlaciones permite dar al crecimiento de la entropía un significado puramente dinámico que no supone el caos molecular. Permite, en efecto, integrar en una ecuación de tipo boltzmanniano la destrucción de correlaciones pre-colisionales por las colisiones, y mostrar que las correlaciones creadas por las colisiones no tienen influencia sobre la evolución del sistema hacia el equilibrio. De este modo, es el flujo de correlaciones el que confiere su validez a la descripción cinética de Boltzmann. La flecha del tiempo definida por Boltzmann no se refiere a una descripción probabilista. Por el contrario, es la dinámica de las correlaciones la que permite fundar la posibilidad de una descripción probabilista.

¿Qué sucede con el estado «más probable», es decir el estado de equilibrio? Tradicionalmente, el comportamiento de un sistema en el equilibrio se describía como perfectamente simétrico respecto al tiempo. En el equilibrio se producen en promedio tantas colisiones que transforman las velocidades v_1, v_2 de dos partículas en velocidades v_1', v_2', como colisiones inversas que

[11] I. Prigoeine, *Non-Equilibrium Statistical Mechanics*, Nueva York. Intersciencc Pud.. Wiley, 1962.

transforman las velocidades v_1', v_2' de otras dos partículas en v_1, v_2. El equilibrio responde así a lo que los físicos denominan principio de «micro-reversibilidad»: las colisiones no nos permiten definir la flecha del tiempo, distinguir el pasado del futuro.

Si se admite el principio de micro-reversibilidad, ¿qué sucede con la irreversibilidad? Esta ya sólo puede referirse a las condiciones de no-equilibrio. La flecha del tiempo no existiría en un recipiente a temperatura uniforme; nosotros la creamos calentando una parte y enfriando otra. Sin embargo, esta respuesta es difícil de admitir si, como hemos visto, es el flujo de correlaciones, determinado por las colisiones, el que da su sentido a la flecha del tiempo cinético.

Simulaciones numéricas recientes[12] han confirmado este punto de vista. Ellas han mostrado que, incluso en el equilibrio, las colisiones crean correlaciones. Tras una colisión entre una partícula i y una partícula j. las velocidades v_i y v_j permanecen correlacionadas. Podemos calcular el valor medio $< v_i(t).v_j(t) >$ del producto $v_i(t).v_j(t)$ tomado sobre todos los pares de partículas i. j que han entrado en colisión en el instante 0. y mostrar que sigue siendo diferente de O durante un tiempo del orden del que separa dos colisiones. En cambio, para toda partícula k que no ha colisionado con i, este valor medio $< v_i(t)v_k(t) >$ es nulo. He aquí un ejemplo de flujo de correlaciones que persiste incluso en el equilibrio. En cada colisión nacen correlaciones entre partículas para desaparecer casi inmediatamente como consecuencia de colisiones sucesivas. Bien entendido que, estando el sistema en el equilibrio, estas correlaciones no tienen ningún efecto macroscópico. Además, el principio de caos molecular de Boltzmann sigue siendo válido: las partículas son independientes *antes* de su colisión.

Podemos concluir así que en el nivel microscópico *la diferencia entre pasado* y *futuro persiste incluso en un sistema en equilibrio.* No es el no-equilibrio el que crea la flecha del tiempo; *es el equilibrio el que impide que la flecha del tiempo, siempre presente en el nivel microscópico, tenga efectos macroscópicos.*

Hemos mostrado, en el tercer capítulo, que el no-equilibrio es fuente de orden. Ahora podemos precisar este enunciado. El no-

[12] I. Prigogine. E. Kestemont y M. Mareschal, *Velocity Correlations and Irreversibility: a Molecular Dynamics Approach*, por publicar.

equilibrio, como resultante de una ligadura macroscópica, no es tanto un creador como un revelador. El es el que permite que la flecha del tiempo aparezca en el nivel macroscópico y se manifesté allí no solamente por la evolución hacia el equilibrio sino también, como hemos visto, por la creación de comportamientos colectivos coherentes.

El estado de equilibrio se presenta pues como un estado más singular todavía desde el punto de vista microscópico que desde el punto de vista macroscópico. En el nivel microscópico el modo de descripción del estado de equilibrio puede prolongarse a los estados próximos al equilibrio. En efecto, no existe diferencia esencial entre los estados de equilibrio, para los que la producción de entropía es nula, y los estados próximos al equilibrio, para los cuales es mínima. Es necesario alejarse del equilibrio para ver aparecer comportamientos macroscópicos cualitativamente nuevos. En el nivel microscópico la situación es diferente. Ya hemos visto en el tercer capítulo que en cuanto pasamos de una situación de equilibrio a una situación de no-equilibrio aparecen correlaciones de largo alcance. Y acabamos de ver que es solamente en el estado de equilibrio en sentido estricto donde la flecha del tiempo queda sin efecto macroscópico. Aquí apunta una nueva unidad conceptual. El estado de equilibrio había sido privilegiado en cuanto que manifestaba, en el nivel macroscópico, la indiferencia respecto al tiempo que se creía característica del comportamiento macroscópico. Por el contrario, el estado de equilibrio aparece en adelante como singular en cuanto que oculta, podríamos decir, estos aspectos esenciales de la actividad de la materia, siempre presentes en el nivel microcópico, que son las correlaciones de largo alcance y la flecha del tiempo.

La conclusión a la que llegamos prolonga, aunque en forma más radical, aquélla a la que habíamos llegado a comienzo de los años setenta [13]. En esa época ya habíamos mostrado que, para sistemas poco densos del tipo de los que había estudiado Boltzmann, la dinámica de las correlaciones permitía construir una función entropía. Sin embargo, para sistemas más densos pareció necesario redefinir los objetos que se definen como

[13] I. Prigogine, C. George, F. Henin y L. Rosenfeld, *Chemica Scripta*, vol. 4, 1973, pp. 5-32.

independientes unos de otros en el equilibrio. Para definir estos nuevos objetos —bautizados como «hipnones» porque «duermen» en el equilibrio mientras que el no-equilibrio les despierta y crea correlaciones entre ellos habíamos introducido inicialmente el tipo de descripción no local con simetría temporal rota, presentado aquí a partir del modelo del panadero. Hoy podemos concluir que el «sueño» de los hipnones sólo es aparente. El tiempo irreversible, limitado por la visión clásica a la descripción macroscópica de sistemas que evolucionan a partir de un estado inicial «improbable», ha penetrado asi en todos los niveles de descripción de los que estaba excluido, comprendido entre ellos el estado de equilibrio.

La convergencia entre dinámica y teoría cinética que acabamos de describir nos ha llevado al pie de la montaña que nos queda por escalar. Es cierto que lo esencial del programa de Boltzmann se ha realizado: la flecha del tiempo ha tomado sentido en tanto que concepto físico irreductible y, con ella, se ha transformado la propia noción de «ley de la Naturaleza». Sin embargo, las dos ciencias que han continuado la dinámica clásica en el siglo xx, la mecánica cuántica y la relatividad, han heredado de aquélla la simetría entre el pasado y el futuro. Ellas siguen solidarias del ideal de precisión infinita del que era portador el principio de razón suficiente. ¿Es posible reencontrar, en el mundo microscópico que rigen la leyes cuánticas, el equivalente del «caos determinista? Las leyes fundamentales de la Naturaleza, tal como las conocemos hoy, ¿son susceptibles de incorporar la flecha del tiempo?

Así pues, en los dos capítulos que siguen buscaremos el tiempo irreversible, tanto en el nivel de los átomos como en el del Universo, los dos «objetos» que están en el centro de la física del siglo XX. El leitmotiv de los que niegan la flecha del tiempo es que, si ella existiera, no se podría comprender por qué todas las leyes físicas fundamentales coinciden en negarla. «Si el tiempo tuviera verdaderamente una flecha, esta conspiración, por parte de nuestras teorías fundamentales, para ocultarnos la flecha del tiempo, será o bien un milagro o bien un accidente de probabilidad mínima»[14]. No hubo ni conspiración ni milagro. Las leyes

[14] H. Mehlberg, «Physical Laws and Time's Arrow», en *Current Issues in the Philosophy of Sciences*, ed. H. Feigl y G. Maxwell. Nueva York, Holt, Rinehart and Winston, 1961, p. 108

de la física no son descripciones neutras sino producto de nuestro diálogo con la Naturaleza, de las preguntas que le planteamos. Queda por ver si incorporando nuevas preguntas en este diálogo podemos hacer prevalecer la flecha del tiempo en los dos edificios conceptuales más audaces que los hombres hayan creado nunca, la física cuántica y la relatividad.

Capítulo 6

LOS INTERROGANTES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Hasta aquí, nuestra exposición se ha limitado a lo que podemos considerar como «adquisiciones», si no definitivas, al menos «estables» en un previsible futuro. En los dos capítulos que siguen trataremos, por el contrario, de cuestiones todavía en plena evolución. Sin embargo, lo que se dirime en estas cuestiones es de tal importancia que nos hemos decidido a tratar de darles una forma que esperamos sea accesible a un público no especialista.

Como hemos visto, la existencia de una flecha del tiempo se ha asociado durante largo tiempo a la marca —casi podríamos decir la tara— de una descripción *fenomenológica*. En el capitulo precedente hemos mostrado cómo esta flecha podría tomar una significación intrínseca en el seno de la dinámica, que fue durante largo tiempo la teoría física fundamental (véase también los Apéndices F y III). Sin embargo, las teorías que los físicos reconocen actualmente como fundamentales son la relatividad y la mecánica cuántica, y ya no la dinámica clásica. La mecánica cuántica es la teoría microscópica por excelencia, aplicable a las moléculas que constituyen la materia. En cuanto a la relatividad, ella ha permitido, por primera vez en la historia de la física, construir «modelos de! Universo» coherentes.

¿Qué relación mantienen estas estructuras conceptuales, que hoy fundamentan nuestra concepción del mundo físico, con el

problema del tiempo? A pesar de su carácter revolucionario, es preciso reconocer a este respecto que la relatividad y la mecánica cuántica son ambas herederas de la tradición clásica: el cambio temporal se concibe en ellas como reversible y determinista.

En lo que concierne a la mecánica cuántica esta afirmación puede sorprender. ¿No se asocia generalmente esta ciencia con el abandono del ideal del determinismo? ¿Y no confiere un significado esencial a la irreversibilidad ya que, como veremos, exige describir la observación como una modificación irreversible de lo que es observado?

Este es el nudo del problema. Tanto la irreversibilidad como el recurso a las probabilidades tienen su origen, según la mecánica cuántica, en el acto de observación. Estas nociones se definen entonces como ligadas a la intervención humana y no como pertenecientes de modo intrínseco al objeto observado. Irreversibilidad y probabilidades guardan en mecánica cuántica un estatuto análogo al que les confirió, tras el fracaso de Boltzmann, la dinámica clásica (véase el cap. 1). Ciertamente, en mecánica cuántica no podemos, como sucedía en la dinámica antes del descubrimiento de la inestabilidad dinámica, oponer el mundo reversible y determinista «en sí» a las apariencias irreversibles y probabilistas que suscitan nuestras aproximaciones, pues la descripción reversible y determinista no remite ya a un mundo observable. Irreversibilidad y probabilidades aparecen como relativas a las condiciones bajo las que puede ser observado el mundo cuántico. Por otra parte, algunos físicos eminentes no han dudado, siguiendo a von Neumann [1], en hacer del hombre consciente el responsable de la producción irreversible de los fenómenos observables que él mide.

Parece así, en el estado actual, que las probabilidades cuánticas introducen un elemento «subjetivista» en física o, más exactamente, traducen la renuncia a una descripción de tipo realista. Sin embargo, como ha subrayado Karl Popper, no existe ninguna razón para identificar el «sueño» de un retorno al realismo con el de un retorno al determinismo. «Mi propio punto de vista es que *el indeterminismo es compatible con el*

[1] J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin, Springer, 1932. Edición española: *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, Instituto Jorge Juan, C.S.I.C., Madrid, 1955. (No se ha reeditado desde entonces.)

realismo, y que la aceptación de este hecho permite adoptar una epistemología objetivista coherente, una interpretación objetiva del conjunto de la teoría cuántica, y una interpretación objetivista de la probabilidad»[2].

Este es, para nosotros, el centro del debate. La noción de observación juega un papel central en mecánica cuántica porque es ella la que permite dar un sentido a las probabilidades. Pero. *¿no han recibido hasta ahora significación intrínseca en el marco de la teoría cuántica?* El elemento «subjetivista» que la mecánica cuántica parece introducir en la física, ¿no refleja el hecho de que las probabilidades y la flecha del tiempo no han sido incorporadas en su estructura teórica, sino solamente ligadas, con la ayuda del concepto auxiliar de observación, a una descripción que les queda ajena?

Como veremos en el próximo capitulo, la misma cuestión se plantea a propósito de los «modelos de Universo» construidos a partir de las ecuaciones de la relatividad general. Einstein ha sido, a su pesar, el Darwin del siglo XX, pero los modelos cosmológicos que en lo sucesivo describen la historia del Universo quedan extrañamente ajenos a cualquier perspectiva temporal: ellos describen una evolución reversible que conerva la entropía.

¿Cómo introducir la cuestión del devenir en el seno de estas estructuras conceptuales fundamentales? Su incuestionable éxito hace la tarea particularmente difícil. Desde luego, todo el mundo sabe que hay problemas que siguen abiertos, especialmente el de la articulación entre relatividad y mecánica cuántica. Sin embargo, ¿cómo no estar tentado de aceptar que, en su propio campo, la mecánica cuántica y la relatividad tengan una forma definitiva? Afortunadamente, el ejemplo de la dinámica clásica nos muestra el peligro de semejante juicio. Como James Lighthill ha expresado con tanta fuerza *(cf.* cap. 5), es precisamente el triunfo de esta ciencia el que ha animado a los especialistas a concluir que todos los problemas planteados en el campo de la dinámica deberían ser tratados siguiendo el mismo modelo.

Una teoría se comprende a través de sus límites, solía recordar Léon Rosenfeld, quien durante largo tiempo fue el más estrecho colaborador de Niels Bohr. Y, del mismo modo que el

[2] K. Popper. *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Totowa. New Jersey. Rowman and Littelfield, 1982. p. 175.

descubrimiento de la inestabilidad dinámica nos ha permitido comprender mejor la idealización que presuponía la mecánica clásica, quizá podamos esperar discernir, por sus propios límites, el ideal que presupone la mecánica cuántica.

No trazaremos aquí la historia que ha llevado a la formulación de la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, la ecuación de Schrödinger. Nos limitaremos a señalar el papel que en ella ha jugado la dinámica clásica, muy especialmente el modelo de los sistemas integrales (descritos, como hemos visto en el cap. 5, en términos de variables de ángulos y de acción).

Las variables de acción, definidas como *invariantes del movimiento*, han jugado en efecto un papel primordial en el primer modelo cuántico del átomo. Ya en 1916, Sommerfeld demostró que las órbitas estacionarias de los electrones en torno al núcleo, que Bohr había postulado tres años antes, podían interpretarse en el marco de la teoría de los sistemas integrables. La «regla de cuantificación» que determina la energía de las órbitas permitidas se expresa de manera sencilla mediante una ligadura sobre las acciones J. Mientras que en dinámica clásica cualquier valor de la acción hubiera sido posible a priori, estos valores están ahora limitados a un conjunto discreto caracterizado por el número cuántico n. Cada órbita estacionaria está así definida por J = nh, donde h es la constante de Planck y n es un número entero positivo (n = 1 define el estado fundamental, n > 1 los niveles excitados). Sin embargo, éste es sólo un aspecto del modelo del átomo de Bohr-Sommerfeld. El segundo aspecto corresponde a las transiciones del electrón de una órbita a otra. La transición se produce de forma discontinua, con absorción o emisión de un fotón correspondiente a la diferencia de energías entre las dos órbitas.

Fue Einstein quien, en 1916, relacionó estas transiciones cuánticas con la famosa ley de Planck que define la distribución de equilibrio de la radiación del cuerpo negro (sobre la que volveremos al final de este capítulo) y que estuvo en el origen de la noción de los quanta. Einstein demostró que para obtener la ley de Planck era necesario introducir dos tipos de transiciones: las transiciones *inducidas* por un campo externo y las transiciones *espontáneas*. Esta última implica que, incluso en ausencia de cualquier campo, un electrón excitado «cae» a un nivel energético inferior emitiendo un fotón.

Einstein había introducido la noción de transición espontánea por analogía con la de desintegración radiactiva. Ella significa en efecto que un electrón excitado puede caracterizarse, igual que un núcleo radiactivo, por una *vida media.* La vida media es una magnitud promedio, estadística, que define como imprevisible el instante preciso en que un electrón volverá a su estado fundamental. Además, la vida media introduce en el nivel cuántico una asimetría entre pasado y futuro: el mecanismo de transición expresa en efecto que, en nuestro futuro, el electrón abandona espontáneamente su estado excitado, exactamente igual que la ley de Fourier expresa que, en nuestro futuro, una diferencia de temperatura irá nivelándose espontáneamente.

Por supuesto, Einstein era consciente de haber introducido, con las transiciones espontáneas e inducidas, un elemento probabilista en la descripción del átomo. Esto era, escribió, una «debilidad». Pero resulta tanto más interesante notar que quien iba a llegar a ser el apóstol más firme de la visión determinista concluyó su artículo de 1916[3] afirmando que el modelo que proponía estaba, no obstante, lleno de promesas.

La introducción por Einstein de un mecanismo de transición espontánea en el modelo de Bohr y Sommerfeld asociaba así a la descripción de tipo dinámico de las órbitas estacionarias una descripción de tipo cinético de los sucesos probabilistas que constituyen los saltos cuánticos espontáneos de los electrones hacia una órbita inferior. Resulta notable que la descripción de Einstein haya sido confirmada recientemente por la observación de saltos cuánticos individuales, tal como es posible hoy día en el laboratorio. Estos saltos tienen la misma irregularidad de un fenómeno aleatorio[4].

La primera teoría cuántica del átomo chocó con numerosas dificultades: en particular, en el caso de átomos con varios electrones los niveles energéticos observados no podían interpretarse de forma satisfactoria. El paso de esta teoría a la mecánica cuántica, tal como hoy la conocemos, no solamente ha permitido

[3] A. Einstein, *Verh. Deutsch Phys. Ges.*, vol. 18, 1916, p. 318.

[4] Véase, para la descripción estadística de los saltos cuánticos. R.J. Cook y H.J. Kimble, en *Phys. Letters,* vol. 54, 1985, pp.1023-1026; para las primeras observaciones, T. Sauter, W. Neuhauser, R. Blatt, P.E. Toschek, *Phys. Letters,* vol. 57. 1986. pp.1696-1698, y J.C. Bergquist. R.G. Hulet, W.M. Itano, D.J. Wineland, ibid., pp. 1699-1702.

resolver estas dificultades sino que también ha abierto la vía a una nueva teoría de las partículas elementales y sus interacciones. Sin embargo, como vamos a ver. también ha tenido como consecuencia circunscribir la descripción del modo de evolución del objeto cuántico en torno al único modelo de sistema dinámico integrable, y vaciar de contenido la noción de transición como suceso irreversible.

La magnitud central de la actual mecánica cuántica es la «función de onda», llamada así debido a su analogía con la ecuación de las ondas luminosas que describe la óptica. Como éstas, la función de onda cuántica puede descomponerse en una superposición de ondas monocromáticas (correspondiente cada una a una longitud de onda dada). La función de onda constituida por la superposición de estas ondas se comporta a la manera de un paquete de ondas luminosas: su evolución en el tiempo obedece a una ecuación reversible determinista, la famosa ecuación de Schródinger.

Sin embargo, la existencia de la constante de Planck h introduce una primera diferencia entre la mecánica cuántica y la física clásica. Esta constante aparece en las relaciones que ligan las propiedades ondulatorias, frecuencia n y longitud de onda λ por un lado, y las propiedades corpusculares, energía y cantidad de movimiento, por el otro. Estas relaciones son $E = hv$ y $\lambda = h/p$. La segunda relación liga una longitud y una cantidad de movimiento. Ella implica que las variables que la dinámica clásica definía como independientes, las oposiciones, medidas por coordenadas que son longitudes, y las cantidades de movimiento, ya no lo son en mecánica cuántica. Por esta razón, el espacio en el que evoluciona la función de onda cuántica, el *espacio de Hilbert*, se construye con la *mitad* solamente de las variables necesarias para construir el espacio de fases clásico. La definición del espacio de Hilbert refleja de este modo la dualidad «onda-partícula»: este espacio se construye *bien* con la ayuda de coordenadas, *bien* con la ayuda de cantidades de movimiento (o momentos).

Esta primera diferencia no es ni mucho menos la única. En efecto, la mecánica cuántica introduce en física entes matemáticos nuevos, los *operadores*. Un operador actúa sobre una función de onda y la transforma en una nueva función de onda. Cuando esta operación se reduce a la simple multiplicación por

un número de la función de partida, la función de onda es una función *propia* del operador, y el número en cuestión uno de sus *valores propios.*

La noción de operador *actuando* sobre una función de onda traduce el nuevo estatus de las magnitudes físicas en mecánica cuántica. En dinámica clásica, la velocidad corresponde a una magnitud que se atribuye a un cuerpo en movimiento. Pero el operador que reemplaza a la «velocidad» en mecánica cuántica ya no es un atributo. Y la función sobre la que actúa no corresponde a una magnitud física observable. Lo observable son los *valores propios* de los operadores. El operador «velocidad» actuando sobre una superposición de sus funciones propias da los diferentes valores posibles de la magnitud física «velocidad».

Entre los operadores cuánticos, el *operador hamiltoniano* juega un papel especialmente importante. Se trata del operador cuyos valores propios son los diferentes niveles energéticos del «objeto cuántico». Estos niveles corresponden a las órbitas estacionarias calculadas gracias a la regla $J = nh$ en la antigua teoría cuántica. La búsqueda de las funciones propias y los valores propios del operador hamiltoniano es un problema análogo al de presentar un sistema dinámico clásico de forma que el hamiltoniano sólo dependa de las acciones [5]. Esta es una observación importante sobre la que volveremos. Limitémonos por el momento a subrayar que en mecánica cuántica cualquier función de onda puede ser representada como una superposición de funciones propias del operador hamiltoniano.

Del mismo modo que la función hamiltoniana en dinámica clásica determinaba la evolución temporal del sistema dinámico, el operador hamiltoniano determina la evolución temporal de la función de onda cuántica en el espacio de Hilbert. Esta evolución de la función de onda es una evolución estática, análoga a la de un sistema integrable. Cada función propia corresponde a un estado *estacionario* caracterizado por un nivel de energía bien determinado, valor propio del operador hamiltoniano. La ecua-

[5] Mientras que en dinámica clásica una transformación unitaria permite, cuando puede ser definida, pasar de $H(p,q)$ a $H(J)$, en mecánica cuántica una transformación unitaria «diagonaliza» la matriz que representa el operador hamiltoniano, es decir, la pone en forma tal que todos sus términos no diagonales sean nulos.

ción de Schródinger, reversible y determinista, describe un conjunto de estados estacionarios superpuestos que evolucionan sin interacción unos con otros, como si cada uno de ellos estuviera solo en el mundo.

En óptica, la ecuación de onda describía la evolución de la amplitud de onda. Del mismo modo, la ecuación de Schródinger describe las «amplitudes de probabilidad». Estas amplitudes corresponden a «potencialidades». Aquí es donde la medida juega un papel esencial: corresponde a la transición de las *amplitudes* de probabilidad a las probabilidades propiamente dichas. Curiosamente, es entonces la medida la que actualiza las potencialidades, y esta actualización no puede ella misma ser descrita en términos de evolución de la función de onda en el espacio de Hilbert. En sentido figurado diremos que para calcular la probabilidad del resultado de una medida necesitamos *salir del espacio de Hilbert.* Es esta «reducción de la función de onda» la que introduce, en la interpretación usual, las probabilidades y la irreversibilidad, nociones ajenas a la evolución determinista y reversible de la función de onda. Esto es lo que ha suscitado la paradoja que, en su libro notable por su lucidez, *Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?,* A.I.M. Rae expresa asi: «Los sistemas cuánticos no poseen propiedades más que cuando estas propiedades son medidas, pero aparentemente no hay nada, fuera de la mecánica cuántica, para efectuar esta medida»[6]. Esta paradoja ha llevado a los físicos, siguiendo a Von Neumann, a señalar la conciencia humana como la única realidad que podría escapar en derecho a una descripción cuántica, y «explicar» así cómo podría producirse la reducción. Ella es igualmente la que ha inducido a algunos a proponer la «many worlds interpretation»[7] para restaurar la objetividad de la mecánica cuántica: la reducción de la función de onda traduciría una ramificación del Universo de suerte que a cada Universo correspondería una de las funciones propias superpuestas por la función de onda inicial y, consiguientemente, de

[6] I.A.M. Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality?,* Cambridge. University Press, 1986, pp. IX-X. Hay edición española: *Física cuántica: ¿ilusión o realidad?.* Alianza Editorial, Madrid, 1988.

[7] Esta interpretación fue propuesta en 1956 por Everett en una tesis dirigida por J. Wheeler, y retomada en 1967 por DeWitt y Graham. Véase *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* B. DeWitt y N. Graham ed., Princeton, University Press, 1973.

forma esta vez «objetiva», la medida del valor propio correspondiente. El hecho de que se haya podido proponer una solución tan extrema da idea del callejón sin salida al que se enfrenta cualquier tentativa de comprender la descripción cuántica actúa! de manera realista.

La dualidad «evolución» de la función de onda, por una parte, y «reducción» de esta función, por otra, es aceptable en los casos en los que el objeto estudiado puede ser considerado «en sí» como reversible, y en donde el único elemento de irreversibilidad proviene de hecho del suceso irreversible que supone la medida. La reducción de la función de onda corresponde entonces a la producción de una «marca» observable por un ser que, «en sí», no rompe la simetría temporal. Este es el caso, por ejemplo, del registro de la posición de un péndulo reversible mediante la impresión de una placa fotográfica.

Pero, ¿no existen sucesos cuánticos *intrínsecamente* irreversibles? En concreto, ¿qué sucede con las transiciones inducidas y espontáneas entre órbitas cuánticas estacionarias que, en la antigua teoría debida a Bohr, Sommerfeld y Einstein, se atribuían al propio átomo y no al acto de observación? ¿Es la medida la única fuente de irreversibilidad en la Naturaleza?

Fue en 1926 cuando Dirac dio la interpretación teórica de las transiciones inducidas y espontáneas de Einstein. En el caso de las transiciones inducidas, la definición del operador hamiltoniano del sistema debe, por supuesto, hacer intervenir la interacción entre el campo electromagnético externo y el átomo. Esta interacción viene representada por un término de «perturbación»: el campo «perturba» los estados estacionarios del átomo. La transición inducida puede ser asimilada entonces a un efecto de resonancia, como el que hemos descrito en el capítulo precedente. Constituye una transferencia de energía entre átomo y campo determinada por la resonancia entre una frecuencia del campo y la frecuencia correspondiente a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce dicha transición. Asimismo, Dirac demostró que las transiciones espontáneas pueden explicarse mediante el campo que el átomo induce y que, a su vez, reacciona sobre él.

La teoría de Dirac abre nuevas perspectivas que permiten considerarla como la base de la *teoría cuántica de campos*. Ella precisa lo que estaba implícito en la idea de transición espontá-

nea de Einstein: el átomo no puede ser considerado como un sistema aislado sino que reacciona a través de su carga eléctrica con un campo —es decir, en derecho, con el resto del Universo—.

El acoplamiento del átomo con el campo que él mismo induce tiene consecuencias notables. En particular, tiene como consecuencia un «efecto radiactivo», una modificación de los niveles energéticos del átomo. En 1947, Lamb confirmó experimentalmente esta predicción teórica fundamental. En teoría clásica también aparecen efectos de este tipo (véase Apéndice II).

Los métodos utilizados en física cuántica para calcular este desplazamiento radiactivo de los niveles no gozan de unanimidad: ellos introducen la «técnica de renormalización», un procedimiento de eliminación de las cantidades divergentes que surgen en el cálculo de perturbaciones. En cualquier caso, el notable acuerdo numérico entre la predicción teórica y el «efecto Lamb» observado es un ejemplo impresionante del poder predictivo de la mecánica cuántica.

¿Podemos decir entonces que la situación es satisfactoria? Hay que subrayar, en primer lugar, que el éxito del cálculo perturbativo se debe a la debilidad de las interacciones electromagnéticas. Los físicos miden estas fuerzas en términos de la constante de estructura fina. $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$, donde e es la carga del electrón, c la velocidad de la luz y $\hbar$ la constante de Planck dividida por 2π. Si a fuera del orden de 1, como en el caso de las fuerzas nucleares, el cálculo perturbativo dejaría de ser aplicable. En términos más físicos, el cálculo perturbativo sólo es aplicable porque la vida media de un estado excitado del electrón es muy larga comparada con su período, o dicho en los términos intuitivos de la primera teoría cuántica, comparada con el tiempo que tarda el electrón en recorrer su órbita. Para el hidrógeno, por ejemplo, la relación entre el periodo y la vida media es del orden de 10^{-5}: el electrón «gira» en promedio cien mil veces alrededor del núcleo antes de abandonar su estado excitado.

Pero el punto esencial para nosotros es que, contrariamente a la primera teoría cuántica —que hacía de un único átomo aislado un sistema mecánico, y reconocía en la transición espontánea un suceso intrínsecamente irreversible—, la teoría de Dirac extiende la descripción mecánica a las interacciones del

átomo con un campo. La ecuación de Schródinger se hace aplicable a la totalidad del sistema «átomo + campo», y, con ella, la noción de amplitud de probabilidad. Desde ese momento, en esta teoría el electrón no «salta» de una órbita a otra, puesto que la amplitudes de probabilidad de la función de onda perturbada evolucionan de forma continua en el tiempo. En consecuencia, la teoría de Dirac no puede dar un sentido preciso a la noción de vida media: ésta puede calcularse a partir del desarrollo perturbativo («regla de oro de Fermi»), pero pierde su significado si el cálculo se lleva más allá. Curiosamente, una noción tan fundamental como la de vida media aparece entonces como incompatible con la descripción rigurosa del sistema [8].

Una vez más, en el origen de la irreversibilidad y las probabilidades está el acto de observación y la reducción de la función de onda que éste implica. Es este acto el que introduce la transición discontinua e irreversible allí donde la ecuación de Schródinger sólo permite hablar de evolución continua. Pero esta referencia a la observación conduce a importantes dificultades conceptuales. Es lo que ya había señalado Schródinger: para hacer explícitas las paradojas de esta interpretación, él imaginó la famosa parábola del gato [9]. Para él, se trataba de cuestionar la mecánica cuántica, de mostrar que ella no puede dar cuenta de lo que se nos impone como suceso *intrínseco*, independiente de cualquier acto de medida.

El gato de Schródinger está encerrado en una caja opaca. Junto a él se haya un átomo inestable cuyos fragmentos, «en el instante en que» este átomo se desintegre, liberarán un martillo que romperá una ampolla que contiene un veneno mortal. Nada impide en principio en la teoría cuántica, recuerda Schródinger, describir el conjunto gato, átomo, martillo, ampolla, etc., mediante una única función de onda que obedece a su ecuación, la ecuación de Schródinger. Ahora bien, la función de onda correspondiente al átomo inestable debe ser representada corno

[8] El hecho de que en esta teorá no se le pueda dar un sentido teórico exacto a una noción como la de vida media, sino que ésta aparece ligada a una aproximación, ha sido subrayado con énfasis por N. Cartwright en *How the Laws of Physics Lie,* Oxford, Clarendon, Press, 1983.

[9] E. Schródinger, «Die Gegenwartige Situation in der Quantenmechanik», en *Naturwissenchaften,* vol. 23, 1935, pp.807-812, 823-828, 844-849; el artículo ha sido traducido al inglés en *Proceedings of the American Philosophical Society,* vol. 124, 1980, pp. 323-338

una superposición de los dos posibles: núcleo intacto/núcleo desintegrado. Entonces, el gato también «superpone» estos dos posibles: gato vivo/gato muerto envenenado. Curiosamente, es sólo en el instante en que abramos la caja y se produzca la transición de las amplitudes de probabilidad a las probabilidades propiamente dichas, cuando la mecánica cuántica nos autoriza a decir: el gato *Do* está muerto *o* está vivo.

La parábola de Schródinger da una fiel imagen de lo que presupone la noción de medida en mecánica cuántica. El carácter opaco de la caja es esencial pues la medida cuántica implica una observación discontinua: levantar la cubierta, ver si el gato está muerto o no. Nuestras medidas de laboratorio apenas se parecen a esta puesta en escena. Nosotros no observamos una placa fotográfica de manera discontinua para saber si ha sido impresionada o no por un electrón: la observamos de forma continua para saber cuando lo será. ¿No podríamos imaginar entonces que el desdichado gato de Schródinger esté colocado en una caja de paredes transparentes sin que cambie en nada su situación?

Curiosamente, en mecánica cuántica no sería así. En 1977. Misra y Sudarshan[10] estudiaron lo que sucedería en la hipótesis *en* que los intervalos de tiempo entre observaciones repetidas sobre un mismo sistema inestable —átomo excitado o núcleo inestable— se hacen cada vez más cortos hasta que, en el límite, estas observaciones puedan ser asimiladas a una observación continua. Ellos establecieron un resultado sorprendente: *cuando el intervalo de tiempo tiende a cero. el formalismo cuántico lleva a la conclusión de que el átomo no podrá abandonar su nivel excitado, ni el núcleo inestable podrá descomponerse.* Es lo que llamaron la «paradoja de Zenón de la mecánica cuántica».

Una observación estrictamente continua es, con toda seguridad, una idealización: cualquier observación requiere un tiempo finito. Pero la medida tal como la define la mecánica cuántica corresponde también a una idealización. La «paradoja de Zenón» completa lo que Schródinger había querido indicar con la parábola del gato: la mecánica cuántica no puede

[10] B. Misra y E.C.G. Sudarshan. «The Zeno' Paradox in Quantum Theory» en *Journal of Mathematical Physics*. vol. 18. 1977. pp 756-763.

responder a la cuestión de saber *cuándo* se ha desintegrado una partícula inestable. De este modo muestra con toda claridad las dificultades que suscita la naturaleza dualista de esta teoría: evolución reversible acoplada a una irreversibilidad provocada por la observación. Esta dualidad implica que en el límite podríamos, según el tipo de observación que llevemos a cabo sobre un sistema cuántico, hacer imposible un fenómeno como el de la emisión espontánea de fotones o la radiactividad.

La analogía entre las reacciones de la mayoría de los físicos ante esta situación y las que suscitó la interpretación probabilista de Boltzmann es sorprendente. Como hemos visto, la idea de que es nuestro modo de observación y de descripción el responsable de la introducción de la irreversibilidad y de la probabilidad ha sido aceptada sin resistencia. Del mismo modo, la mayoría de los físicos han aceptado como ineludible la idea de que es el acto de observación el que destruye la cadena de la superposiciones cuánticas con la reducción de la función de onda. Entre ellos, los que no han llegado a atribuir este papel a la conciencia humana han avanzado con frecuencia la hipótesis de que esta destrucción se debe a que la operación de medida reviste el carácter de una «aproximación». Del mismo modo que el observador individual, reversible, de las partículas, así el carácter grosero de nuestras medidas no nos permitirá distinguir entre el gato muerto-vivo que postula la teoría cuántica, y el gato muerto *o* vivo que observamos.

La parábola del gato de Schródinger se ha convertido así en el símbolo de la intervención humana en el mundo cuántico: ya esta intervención remita a la conciencia humana o al carácter «solamente macroscópico» de nuestros instrumentos, es de ella de quien parece depender la posibilidad de hablar del gato como muerto o vivo.

Nosotros no creemos que la paradoja del gato de Schródinger y la de Zenón remitan solamente a problemas de interpretación. El hecho de que la mecánica cuántica no pueda expresar la probabilidad de que se produzca una transición cuántica *en cierto instante*, refleja a nuestro modo de ver el hecho de que este formalismo —que, ya en 1927, uno de sus creadores, Max Born, describió como definitivo: «consideramos que la mecánica cuántica es una teoría completa, y que sus hipótesis, tanto físicas

como matemáticas, no son susceptibles de nuevas modificaciones»[11] — es en verdad completo.

¿Podemos esperar «modificar» las hipótesis físicas y matemáticas de la mecánica cuántica a pesar del hecho de que, sesenta años después de la afirmación de Born, el poder predictivo de este formalismo no ha sido nunca desmentido? ¿Podemos restituir un sentido intrínseco a la noción de suceso cuántico? La historia de la ciencia nos muestra que una teoría puede sufrir una transformación radical aunque sus predicciones sólo sufran al principio modificaciones débiles. Por ejemplo, la dinámica clásica introducía interacciones instantáneas cuando, según la relatividad, estas interacciones se propagan con velocidad finita. A pesar de esta diferencia fundamental, las dos teorías conducen a resultados muy próximos en el dominio de la mecánica celeste.

Hay que subrayar que nos situamos en una perspectiva muy diferente de la de Einstein y de todos aquéllos que, tras él, quisieron ir «más allá» de la mecánica cuántica. En su «testamento» científico[12], Einstein retomó en 1949 la crítica de Schrödinger pero, como este último por lo demás, él esperaba que un progreso de la física permitiría volver al determinismo clásico. Por el contrario, nosotros tratamos de dar un sentido fundamental a la noción de vida media tal como se ha impuesto experimentalmente: noción esencialmente probabilista que traduce el carácter *incontrolable* del suceso. Mientras que la mayor parte de los críticos del formalismo cuántico intentaban, de una u otra forma, volver a una representación clásica, nosotros partimos de la idea de que es el carácter probabilista de esta teoría el que debe ser acentuado todavía más.

En una carta a Born, Pauli había hecho notar a propósito de las críticas de Schródinger, Eisntein y Bohm: «Es imposible que más tarde..., se descubra algo completamente nuevo, pero soñar una vuelta atrás, hacia el estilo clásico de Newton y Maxwell (y no otra cosa que un sueño es en lo que se complacen estos señores), esto me parece sin esperanzas, fuera de propósito y de

[11] Observación hecha en la Quima Conferencia Solvay, «Electrons and Photons», cuyas actas fueron publicadas en Gauthiers-Villars en 1928.

[12] En *Albert Einstein, Philosopher Scientist*, editado por P.A. Schlipp, The Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949. pp. 669-671.

muy mal gusto. Y, podríamos añadir, ni siquiera es un sueño deseable»[13].

Nosotros compartimos la opinión de Pauli: «ni siquiera es un sueño deseable». Pero, ¿es posible transponer en mecánica cuántica el camino que nos ha llevado, en dinámica clásica, de la noción de trayectoria reversible a la de evolución dinámica intrínsecamente probabilista? ¿Es posible «abrir» también la mecánica cuántica al «mensaje de la entropía»? Como vamos a precisar más adelante, nosotros entrevemos una respuesta afirmativa a esta pregunta.

En el capítulo precedente hemos descrito la teoría cinética centrada sobre las nociones de colisión y dinámica de las correlaciones creadas por estas colisiones. También aquí es una teoría de tipo cinético la que podría sustituir a la teoría actual central sobre la evolución de la función de onda en el espacio de Hilbert. Por supuesto que esta sustitución deberá permitirnos definir en qué casos conserva su validez la descripción actual. En efecto, hoy conocemos en mecánica cuántica, junto a sistemas para los que un razonamiento de tipo cinético sea impuesto desde el principio como «aproximación pertinente», otros sistemas como comportamiento macroscópico coherente: los superconductores, por ejemplo. En tales casos la representación actual en términos de funciones de onda seguirá siendo adecuada.

Nuestra perspectiva está entonces próxima a lo que Popper llamaba su *«metaphysical dream»*: «Probablemente, aún en ausencia de «sujeto observador» que experimentase e interfiriese con él, nuestro mundo seria tan indeterminista como lo es»[14]. En efecto, el abandono de la función de onda permite, como veremos, dar un sentido al suceso cuántico intrínsecamente irreversible, es decir, resolver las principales «paradojas» que habían suscitado la acusación de «subjetivismo» lanzada a la mecánica cuántica.

Como hemos dicho, la mecánica cuántica hace corresponder a las magnitudes físicas operadores que, en general, no conmu-

[13] Carta de Pauli a Max Born citada por este último en «The Interpretation of Quantum Mechanics», en *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 4, 1953, p. 106; citada en K. Popper, *Quantum Theory and the Schism of Physics*, op. cit., p. 175.

[14] K. Popper, *op. cit.*, p. 177.

tan entre sí. De esta forma, debido a que los operadores correspondientes al momento y la posición no conmutan, no podemos atribuir simultáneamente una posición y un momento bien determinados a un sistema cuántico. Esto es lo que expresa la famosa relación de incertidumbre de Heisenberg, $\Delta p \Delta q \geqslant \hbar$. En dinámica clásica es idealmente posible caracterizar el estado instantáneo de un sistema dinámico mediante posiciones y momentos (o velocidades) tan precisos como queramos porque estas variables son independientes. En mecánica cuántica ellas ya no lo son y es necesario escoger una representación —un conjunto de funciones propias— u otra. Como Bohr había hecho notar, esta elección corresponde a la del dispositivo de medida, a la forma que elige el observador de interferir con el ente cuántico para extraer de él uno u otro tipo de información. Los dos tipos de medida son así *complementarios.* Si medimos con precisión la posición no podremos determinar simultáneamente el valor del momento, y viceversa.

Otra relación de incertidumbre liga en mecánica cuántica la energía y el tiempo: $\Delta E \Delta t \geqslant \hbar$. Esta relación, aparentemente análoga a la precedente, ha suscitado gran número de discusiones. En efecto, ella no puede ser entendida como expresando el carácter complementario de dos tipos de medida. La mecánica cuántica no define ningún operador «tiempo». Por ello no se puede hablar de no-conmutación entre el operador «tiempo» y el operador energía. Sin embargo, la relación de incertidumbre entre tiempo y energía es esencial en la descripción de los estados cuánticos de duración finita. En este caso la incertidumbre sobre el tiempo At está ligada a la vida media T del estado inestable. Más exactamente, se toma $\Delta t = 2\tau$ y se escribe la relación de incertidumbre en la forma $\Delta E \geqslant \hbar/2\tau$. Esta relación liga así la vida media que caracteriza a un estado excitado y la dispersión de la energía correspondiente a este estado, es decir, la anchura de la raya espectral.

Insistamos en la diferencia entre esta relación y las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. La vida media es una magnitud física bien definida. Para cada tipo de experimento toma un valor numérico determinado. Por ello, la relación $\Delta E \geqslant \hbar/2\tau$ fija un límite intrínseco a la precisión con que podemos medir una *única* magnitud, en esta ocasión la energía de un estado estacionario caracterizado por una vida media finita.

La diferencia entre las relaciones de incertidumbre de Heisenberg y la relación que liga la dispersión de la energía y la vida media traduce de este modo la diferencia entre el tipo de situaciones experimentales a propósito de las que Bohr había construido la idea de complementariedad, y el que prevalece cuando se observa una emisión espontánea de fotones o una emisión radiactiva. En el primer caso, la medida responde a la iniciativa del experimentador. En el segundo, el suceso no está determinado por la interacción con un dispositivo de medida: independientemente de ello el fotón es emitido o el núcleo se desintegra y nosotros nos limitamos a registrar el fenómeno.

Quizá esta profundización de la cuestión de lo que podemos medir, de los diferentes tipos de relaciones que podemos establecer con un ente cuántico, es uno de esos desarrollos cuya posibilidad preveía Rosenfeld cuando escribió: «Ciertamente, sería desmentir todas las enseñanzas que hemos aprendido a extraer del desarrollo de la ciencia en el pasado, el pretender erigir de un golpe la complementariedad de un dogma que jamás debería ser superado. Muy al contrario, si hay un pronóstico que sacar de las lecciones de la historia, éste es que debemos esperar todavía otras renovaciones de nuestra concepción de las relaciones entre los diversos aspectos de los fenómenos, no desde luego en el sentido de un retorno a la causalidad clásica sino más bien por el establecimiento de nuevas relaciones de complementariedad tanto en el propio dominio de la física como, quizá, en otras regiones en las que el físico sólo se arriesga ahora tímidamente» [15].

Escribamos la relación de incertidumbre $\Delta E \geqslant \hbar/2\tau$ en una forma que acentúa su analogía con las distribuciones estadísticas que encontramos en la teoría cinética. La dispersión estadística de la energía se define como la diferencia entre el valor medio del cuadrado de la energía $\overline{E^2}$ y el cuadrado de la energía media $(\overline{E})^2$. Escribiremos entonces: $E^2-(E)^2 \geqslant (\hbar/2\tau)^2$. Podemos notar la analogía con la distribución «maxwelliana» de velocidades que corresponde al estado de equilibrio: también allí el valor medio del cuadrado de la velocidad es, en general, diferente del cuadrado de la velocidad media. Mientras que la

[15] L. Rosenfeld. «L'Evolution de l'idée de causalité», en *Memoires de la Société Royale des Sciences de Liège*, 4." serie, t. VI. fasc. 1, 1942. pp. 57-87.

primera, $\overline{v^2}$, es proporcional a la temperatura, la segunda $(\bar{v})^2$, es, como sucede con v, nula en un sistema en reposo respecto a su referencial.

Está claro que si queremos tomar en serio la noción de vida media y la relación de incertidumbre asociada a ella, es necesario modificar la noción de observable en mecánica cuántica, y dar a la dispersión probabilista de la energía un significado intrínseco, independiente del acto de observación. La situación es entonces análoga a la que hemos descrito en el capítulo 5. La existencia de sistemas caracterizados por una vida media finita implica que, para tales sistemas, la noción de nivel de energía bien determinado deja de estar —igual que la de trayectoria para los sistemas caóticos— bien definida. En aquellos casos en los que esta noción debe ser abandonada es donde una representación de tipo cinético sustituye a la representación de un sistema cuántico en términos de funciones propias que evolucionan en un espacio de Hilbert.

Como ya hemos indicado, el hecho de que los estados estacionarios excitados sean inestables y, por lo tanto, caracterizados por una vida media, se explica, a partir de Dirac, por la resonancia, la transferencia incontrolable de energía entre el átomo y el campo que él mismo induce. Ahora bien, el átomo en interacción con su campo constituye un «gran sistema cuántico» al que puede extenderse, nosotros lo hemos demostrado, el teorema de Poincaré [16]. En efecto, en este caso la transformación que diagonaliza el operador hamiltoniano diverge, lo que significa que se hace imposible determinar las funciones propias y valores propios de este operador, es decir, definir los niveles de energía asociados a los valores propios del hamiltoniano.

La «catástrofe» de Poincaré se repite entonces en este caso: contrariamente a los que presuponía la representación cuántica habitual, los sistemas caracterizados por tales resonancias *no pueden describirse en términos de superposición de funciones propias del operador hamiltoniano,* es decir, de invariantes del movimiento. Los sistemas cuánticos caracterizados por tiempos de vida media, o por comportamientos que corresponden a «colisiones», constituyen entonces la forma cuántica de los

[16] T.Y. Petrosky e I. Prigogine, «Poincaré's Theorem and Unitary Transformations for Classical and Quantum Systems», en Physica, vol. 147 A, 1988, p 439.

sistemas dinámicos con comportamiento caótico que hemos estudiado más arriba.

Hemos visto en el capítulo 5 que en el caso de grandes sistemas clásicos se puede sustituir la transformación unitaria tradicional por un nuevo tipo de transformación no unitaria. Mientras que aquélla conducía a representar el hamiltoniano en términos de acciones únicamente, ésta lleva a una representación del sistema de tipo cinético, con simetría temporal rota. Análogamente, en el caso de sistemas cuánticos grandes hemos demostrado que un nuevo tipo de transformación no unitaria permite evitar las divergencias que dificultan la diagonalización del hamiltoniano. Esta transformación lleva a describir la evolución del sistema mediante una forma de ecuación cinética con simetría temporal rota [17].

No podemos entrar aquí en detalles demasiado técnicos. Señalemos, sin embargo, la profunda analogía entre la situación que encontramos en mecánica cuántica y la que hemos analizado en dinámica clásica. Por ejemplo, el teorema de recurrencia de Poincaré. que condena a todo sistema dinámico a volver a pasar en el futuro por su estado inicial, sigue siendo válido en mecánica cuántica: el comportamiento de un sistema cuántico finito es cuasi-periódico. Sin embargo, en el caso de un sistema cuántico grande este período tiende a infinito. Del mismo modo que la existencia de un horizonte temporal, que limita de manera intrínseca nuestras posibilidades de predicción, hacía perder su sentido al retorno periódico de un sistema dinámico caótico a su estado inicial, aquí los tiempos de vida media o de relajación crean una escala de tiempos intrínseca con respecto a la que el carácter cuasi-periódico del comportamiento de un sistema cuántico pierde su sentido.

Como en el caso clásico, hay que subrayar que la noción de «sistema grande» no basta para imponer el abandono del modelo integrable. La superconductividad, en particular, da un ejemplo de sistema cuántico grande con comportamiento coherente. Sin embargo, hay que notar que la noción de «sistema cuántico grande» es mucho más extensa que su análogo clásico. En efecto, ella incluye el caso del átomo en interacción con el

[17] I. Prigogine y T.Y. Petrosky. «An Alternative to Quantum Theory», en *Physica*, vol. 147 A, 1988. p. 461.

campo que induce, *y* no solamente los sistemas compuestos por un gran número de átomos.

Retrospectivamente podemos comprender mejor la estructura de la primera teoría cuántica. En efecto, solamente en el caso de que el átomo no se encuentre acopiado a un campo puede ser descrito en términos de invariantes, de estados estacionarios estables. En ei caso en que un acoplamiento con un campo induce fenómenos de resonancia se impone la descripción intrínsecamente probabilista de las transiciones inducidas *y* espontáneas, análoga a la descripción cinética de Boltzmann.

El abandono del modelo de ios sistemas integrables tiene consecuencias tan radicales en mecánica cuántica como en mecánica clásica. En este último caso implicaba el abandono de la noción de punto y de la ley de evolución reversible que le corresponde. En el segundo, implica el abandono de la función de onda y de su evolución reversible en el espacio de Hilbert. En ambos casos, este abandono tiene el mismo significado: nos permite descifrar el «mensaje» de la entropía.

El abandono de la función de onda sujeta a una ley de evolución reversible, como el del punto y su trayectoria, señala de hecho el carácter ilegítimo —salvo para un conjunto restringido de casos limites— del ideal de definición y control que presuponían estas nociones. El átomo en interacción con su campo no tiene el carácter controlable que le presupone la ecuación de Schródinger. Del mismo modo que nos es imposible, después de tiempos de evolución largos comparados con el tiempo de Lyapounov, preparar por inversión de velocidades un sistema de suerte que «remonte» hacia su estado inicial —es decir, lucha contra el «olvido» irreversible de las correlaciones creadas en las colisiones— también nos es imposible preparar un estado excitado de tal suerte que el átomo no pueda volver a su estado fundamental. Y en ambos casos esta pérdida de control se traduce por una descripción con simetría temporal rota y no local. Los niveles de energía bien determinados son sustituidos por una distribución estadística de la energía cuya dispersión es inversamente proporcional a la vida media. El abandono del modelo integrable permite así dar su significación exacta a la relación $\Delta E \geqslant \hbar\ 2\tau$.

No podemos describir aquí la profunda transformación de las estructuras matemáticas de la teoría cuántica v de la defini-

ción de los observables que implica esta nueva descripción, que está todavía en curso de elaboración. Limitémonos a precisar que, del mismo modo que las relaciones de incertidumbre de Heisenberg implican el carácter no conmutativo de los operadores cuánticos, la dispersión de la energía implica operadores «no distributivos» respecto a la multiplicación.

Todavía estamos en el estado inicial de la formulación de una teoría cuántica «sin función de onda», que reemplazaría la función de onda que evoluciona en el espacio de Hilbert por una descripción de tipo cinético. En cualquier caso, llegarnos a nuevas predicciones que conciernen a la «paradoja de Zenón» y los niveles de energía de los estados caracterizados por una vida media finita.

La aproximación cinética suprime la paradoja de Zenón según la cual, si el tiempo que separa dos observaciones tiende a cero, un átomo no podría abandonar su estado excitado ni un núcleo inestable podía desintegrarse. Un desacuerdo entre las predicciones experimentales de la mecánica cuántica usual y del enfoque cinético es difícilmente concebible en lo que respecta a los primeros estados excitados del átomo de hidrógeno. En efecto, tal desacuerdo implica que el intervalo entre dos medidas sucesivas sea corto comparado con el período orbital que caracteriza a un estado excitado (el inverso de su frecuencia). En el caso del primer estado excitado del átomo de hidrógeno este período es del orden de 10^{15} segundos. Serían precisas entonces medidas de muy alta resolución temporal. Sin embargo, para los estados fuertemente excitados (de número cuántico del orden de 100), este periodo ya es de 10^{9} segundos y el experimento podría realizarse en un futuro.

El segundo efecto que predecimos es un desplazamiento de los niveles energéticos del átomo relacionado con la vida media de estos niveles (véase Apéndice II). Como la propia media, este desplazamiento distinguiría el futuro del átomo de su pasado, lo que significaría que el más sencillo de los sistemas cuánticos, el átomo de hidrógeno, estaría marcado por la flecha del tiempo que comparte con el resto del Universo.

El desplazamiento predicho depende esencialmente del parámetro p, relación entre un «tiempo reversible», el período orbital característico del nivel energético, y su vida media, que corresponde a un proceso irreversible. En el caso de un átomo cuyo

núcleo tiene una carga Z, la mecánica cuántica muestra que la magnitud de p es $Z^2\alpha^3$, donde α es la constante de estructura fina que, recordemos, tiene un valor de 1/137. El término dominante en la desviación respecto a las predicciones de la mecánica cuántica sería proporcional al cuadrado de p y, por lo tanto, sería del orden de 10^{-13} para el átomo de hidrógeno.

En lo que respecta a las situaciones experimentales usuales, la desviación que predecimos es demasiado débil para ser medible lo que es una suerte dado que ya hemos señalado la precisión con la que las observaciones experimentales actuales confirman las predicciones teóricas. Sin embargo es posible imaginar situaciones experimentales tales que el desplazamiento que predecimos sea medible. Así, parece particularmente interesante el caso del átomo «con tres niveles», es decir, un átomo del que consideramos el estado fundamental, O, y dos estados excitados, 1 y 2, muy próximos uno a otro, y tales que un electrón situado en el estado 2 no pueda alcanzar directamente el estado fundamental sino que primero debe pasar por el estado 1. Esta es la situación que corresponde al átomo de hidrógeno en el que. inmediatamente por encima del estado fundamental (llamado 1s) tenemos dos estados excitados muy próximos (los estados 2s y 2p). El nive! 2s tiene una energía ligeramente superior a la del nivel 2p. La diferencia corresponde precisamente al efecto Lamb señalado más arriba *. El estado 2p tiene una vida media mucho más corta que el estado 2s. El parámetro ro depende entonces del tiempo «reversible» asociado a la transición 2s-2p, que es del orden de 10^{-9} segundos. Desestabilizando el estado 2s mediante un campo electromagnético incidente se podría definir una situación en la que los efectos predichos llegarían a ser efectivamente medibles.

Uno de los grandes éxitos de la electrodinámica cuántica ha sido el de servir de modelo a la teoría de las interacciones fuertes. Sin embargo, desde el punto de vista que aquí defendemos, la estructura actual de la electrodinámica cuántica refleja su parti-

* Experimentos recientes (Sokolov, 1982) dan un valor de 1057,8583(22) MHz para el desplazamiento Lamb entre los niveles 2s y 2p del átomo de hidrógeno, frente a un valor teórico de 1057,862(20) MHz obtenido por Newton el al.(1979). La discrepancia relativa entre teoría y experimento es asi menor que 4 díezmillonésimas. Para átomos hidrogenoides de mayor número atómico las discrepancias son bastante mayores [N. del T.]

cularidad, el pequeño valor de la constante de estructura fina a y, consiguientemente, de los efectos ligados a la irreversibilidad intrínseca de los comportamientos cuánticos. Pero en el caso de las interacciones fuertes la situación es muy diferente. El propio objeto de la física de altas energía no es otro que las cascadas de transformaciones, tanto más diversas cuanto más elevada es la energía, a lo largo de las cuales las partículas que entran en colisión disipan su energía creando otras partículas. Ahora bien, en el caso de las interacciones fuertes la magnitud que juega un papel equivalente a la constante de estructura fina a, y por lo tanto también el parámetro ro son del orden de 1. Los efectos disipativos deberían entonces hacerse mucho más importantes.

La interacción entre materia y luz ha jugado un papel fundamental en la física del siglo XX. La noción de cuanto de energía luminosa que está en la base de la mecánica cuántica tiene su origen en el estudio, que llevó a cabo Planck, de la radiación del «cuerpo negro» y, como hemos visto, fue también a partir de la distribución energética de la radiación del cuerpo negro como Einstein formuló su descripción de las rayas espectrales en términos de transiciones inducidas y espontáneas. Ahora bien, como ha recordado Thomas Kuhn[18], esto tuvo origen en la tentativa de dar a la evolución irreversible hacia el equilibrio una interpretación que superase los obstáculos encontrados por Boltzmann, lo que llevó a Max Planck a introducirse en el estudio de la «radiación del cuerpo negro». La radiación del cuerpo negro es de hecho el final de una evolución en el curso de la cual una radiación luminosa, absorbida y reemitida por los átomos que constituyen las paredes de la cavidad que la contiene, «olvida» irreversiblemente su distribución energética inicial para pasar a depender solamente de la temperatura de la cavidad. Planck esperaba que el mecanismo de interacción luz-materia, la absorción y la emisión, constituiría el mecanismo de evolución intrínsecamente irreversible que Boltzmann había esperado —con todo derecho, como ahora sabemos— encontrar en la colisión.

Con la hipótesis de un desplazamiento de los niveles energéti-

[18] T. Kuhn, *op. cit. Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford, Clarendon Press, 1978.

cos del átomo ligado a su vida media, reencontramos la esperanza inicial de Planck de unir irreversibilidad e interacción entre luz y materia. En efecto, este desplazamiento puede ser interpretado físicamente como un ejemplo de «amortiguamiento por radiación». Un efecto así parece en la teoría clásica que predice que un oscilador cargado emite una radiación y sufre por ello un amortiguamiento que modifica su frecuencia. Por otra parte, fue precisamente para evitar este problema, en el caso de los electrones orbitando en torno al núcleo, por lo que Bohr debió introducir la noción de órbita estacionaria, es decir, postular que el electrón en movimiento no disipa irreversiblemente su energía. Pero esto no es más que una primera aproximación corregida por las transiciones espontáneas e inducidas de Einstein.

De esta forma llegamos a una «síntesis» entre la primera teoría cuántica, que se nutrió esencialmente de la termodinámica estadística, y la segunda, que trató de dar una explicación puramente mecánica de los procesos que resultan del acoplamiento entre un átomo y un campo electromagnético. El átomo reversible de la mecánica cuántica es una idealización; la definición intrínseca del átomo es relativa al *proceso disipativo* que resulta de su acoplamiento con el campo. Las leyes reversibles se muestran, a partir de ahora, relativas a casos límites. Pero esta síntesis sólo es un primer paso. Queda por explorar un terreno inmenso. El mundo cuántico es un mundo de procesos cuya descripción debería, con el mismo derecho que la del acoplamiento entre el átomo y su campo, hacer explícita la flecha del tiempo. En todos los niveles, nuestras descripciones actuales hacen intervenir las nociones de resonancia y de colisión, y podemos esperar reencontrar allí fenómenos intrínsecamente irreversibles.

Llegados al final de este capítulo podemos medir el camino recorrido. Mientras que las leyes de la física clásica negaban la flecha del tiempo, hoy podemos afirmar que el devenir irreversible marca todos los entes físicos. La inversión respecto a la perspectiva tradicional que identificaba irreversibilidad y descripción fenomenológica es completa: si la experiencia confirma nuestras predicciones no existe ningún sistema cuántico estrictamente reversible. En esta perspectiva, el éxito de la descripción reversible de la mecánica cuántica tradicional, lejos de expresar una verdad «fundamental» acerca de lo real, refleja la particula-

ridad de la interacción entre el átomo y el campo electromagnético, es decir, el pequeño valor de la constante de estructura fina. El átomo es una estructura estable que sólo está marcada de manera casi imperceptible por el devenir irreversible del que participa. Esta particularidad refleja en sí misma la de nuestro Universo «tibio» en donde pueden existir y estar aisladas las estructuras estables que son los átomos. En cambio, en el Universo caliente que fue, según las teorías actuales, el de los trescientos mil primeros años del Universo, así como en las colisiones altamente energéticas que estudia la física de altas energías, la física debería hacerse ciencia de procesos intrínsecamente irreversibles.

Retrospectivamente se aclara además la cuestión tan controvertida de la observación en mecánica cuántica. La irreversibilidad, que el acto de observación introducía de manera aparentemente arbitraria en mecánica cuántica, es una condición necesaria del conocimiento. El carácter en sí mismo inobservable del «mundo» descrito por la teoría cuántica actual es la consecuencia directa del papel de modelo que ha jugado en su construcción la noción del sistema dinámico integrable: un objeto concebido como intrínsecamente irreversible hace ininteligible la posibilidad de su propia observación. La clasificación de los sistemas dinámicos nos permite hoy identificar los límites de este modelo y. conforme al «sueño metafísico» de Karl Popper. encontrar una forma de realismo centrada no en torno a la noción de evolución determinista sino en torno a la de *suceso.* Estos sucesos son los que permiten nuestro diálogo experimental con el mundo microscópico, es a ellos a los que una teoría realista del mundo cuántico debe dar sentido para escapar a las paradojas que reiteradamente aparecen en la mecánica cuántica desde su creación.

De este modo podemos comprender mejor los argumentos de Niels Bohr respecto a la necesidad de integrar la definición del dispositivo experimental en la del fenómeno. En efecto, estos argumentos sitúan los límites del formalismo actual basado en el modelo de sistemas integrables. La validez de este modelo implica que el suceso a partir del cual es identificable el objeto cuántico como tal no caracteriza este objeto de manera intrínseca sino que caracteriza su interacción con un dispositivo experimental. Sin embargo, la debilidad del argumento de Bohr ha

sido siempre la ausencia de definición intrínseca de lo que es un dispositivo experimental. ¿No éramos nosotros quienes *decidíamos* considerar un sistema cuántico grande como un instrumento y no como un objeto cuántico, descrito en derecho por una superposición de funciones propias. Así es como comenzaba la regresión que llevaba finalmente, como había mostrado Von Neumann, a la conciencia del observador.

Pues bien, a partir de ahora la vía de esta regresión se corta no por una decisión arbitraria sino por la propia teoría. La cuestión no es saber «dónde» escogeremos abandonar la descripción cuántica en términos de funciones de onda que evolucionan en el espacio de Hilbert, sino saber dónde deja de ser válido el formalismo basado en la noción de sistema dinámico integrable: en el nivel del propio suceso cuántico, como es el caso de las transiciones electrónicas, o bien en el nivel de la interacción que permite el registro por un instrumento de medida. El dualismo del formalismo cuántico actual, que hace coexistir la evolución de una función de onda, superposición de funciones propias, y su reducción, que rompe esta superposición, encuentra así su sentido físico en la *clasificación de los sistemas dinámicos.* Es el suceso cuántico, caracterizado por una vida media, y no el «acto de observación», el que rompe la superposición cuántica.

Lo dijimos en la introducción de este libro: nuestra andadura es de apertura y de continuidad a la vez. Apertura hacia una nueva coherencia de la física, continuidad que nos permite comprender el éxito de teorías pasadas pero también su contingencia. Esta contingencia nos sitúa en la historia humana —la que conduce a privilegiar la estabilidad previsible de los movimientos planetarios frente al carácter caótico del juego de dados, por ejemplo— pero también en la historia del Universo. Evidentemente, en ninguno de los dos casos contingencia quiere decir arbitrariedad. ¿Cómo sorprenderse de que desde la más alta Antigüedad el retorno regular de los planetas haya hecho impacto en la imaginación y suscitado el interés de los hombres? Análogamente, el hecho de que nuestro Universo sea tibio y permita la exitencia de átomos estables es también la condición para la construcción de las moléculas y para la aparición de seres vivos. No obstante, la posibilidad de afirmar la universalidad de la flecha del tiempo, es decir, de superar la doble contingencia de la historia de la física y de la historia del Universo, no nos aleja

del mundo en que vivimos. Por el contrario, nos permite comprender la profunda coherencia de lo que la física tradicional oponía como «fenomenológico» o como «fundamental», los procesos físico-químicos, el mundo de los sucesos cuánticos, y quizá también, como veremos en el próximo capítulo, el mismo nacimiento del Universo que habitamos.

Este es, para nosotros, el mensaje esencial de este libro. El tiempo es el hilo conductor que hoy nos permite articular nuestras descripciones del Universo en todos los niveles. Pero la idea de una «emergencia» del tiempo irreversible es oscura: ¿cómo, a partir de una realidad esencialmente intemporal, podría surgir este tiempo creador que constituye la trama de nuestras vidas? Necesitamos identificar el tiempo irreversible en todas partes o no podremos comprenderlo en ninguna.

Capítulo 7

EL NACIMIENTO DEL TIEMPO

Hace poco más de veinte años, el descubrimiento por Penzias y Wilson de una radiación fotónica de aproximadamente 3°K puso a la física, en palabras de Wheeler [1], frente a la mayor de sus crisis. Esta radiación, que baña la totalidad de nuestro Universo observable, fue reconocida como la tenue huella, hoy casi imperceptible, del gigantesco suceso que constituye el «nacimiento» de este Universo. La hipótesis del «Big Bang», hasta entonces considerada como una especulación matemática, se convertía en un problema físico.

El problema del Big Bang será el centro de este capítulo. Hemos preferido introducirlo desde el principio para subrayar en qué medida ha supuesto una sorpresa para los físicos la posibilidad misma de discutir el «nacimiento» del Universo. La crisis de la que hablaba Wheeler es ante todo la de la imagen de la física. Para muchos físicos actuales sigue siendo inimaginable que la física pueda tomar el Universo como objeto y aventurarse así en un dominio hasta ahora reservado a la especulación.

El mismo término de «cosmos» implicaba, para los griegos, que la totalidad de lo existente no puede ser pensada sino como orden, armonía, belleza. El cosmos no es «algo» con lo que

[1] Citado en H. Pagels, *Perfect Symmetry*, Bantam Books, New York, 1986, p. 165.

tengamos que tratar sino una fuente de significación que nos sitúa y da sentido a nuestra existencia. Del mismo modo, el pensamiento del Universo cristiano es inseparable del proyecto de la Creación divina. Ya hemos citado a Giordano Bruno, para quien el Universo sólo puede pensarse como lo impensable, infinidad inmóvil, inalterable, incorruptible, ajeno a las categorías que nos permiten comprender el mundo de las criaturas finitas. A finales del siglo XVIII, Kant hará de las especulaciones acerca del Universo una ilusión de la razón: no puede existir concepto del Universo pues éste no puede ser objeto de ninguna experiencia. En este contexto, ¿cómo no comprender, el movimiento de rechazo de algunos físicos frente a la idea de que la física pueda hacer del Universo un auténtico objeto de ciencia? Por supuesto, numerosas «visiones del mundo», que proceden por extrapolación a partir de las leyes de la física, han contravenido e! interdicto kantiano. Asi, en el siglo XX la imagen de un Universo «newtoniano», eterno como la materia y las leyes que rigen su movimiento, se opone a la de un Universo «termodinámico», también eterno pero que evoluciona hacia una muerte térmica que pondrá fin a toda historia. El pensamiento del eterno retorno, que nace de este contraste, simboliza a la vez el conflicto científico entre dinámica y termodinámica que hemos descrito, y la antigua relación entre la concepción del Universo y la cuestión del significado de nuestra existencia. Para Abel Rey [2], e! eterno retorno se derivaba del teorema de recurrencia de Poincaré según el cual todo sistema dinámico volverá a pasar por un estado tan próximo como se quiera a su estado inicial, teorema del que hemos mostrado en el capítulo 5 que pierde validez en el caso de ios sistemas inestables. Para Nietzsche, el eterno retorno es menos una consecuencia de la ciencia que una afirmación: implica la voluntad de vivir cada instante de tal manera que podamos soportar la idea de que este mismo instante se repetirá un infinito número de veces en el futuro.

Universo inmutable o Universo destinado a la muerte: si bien estas dos concepciones se inspiran en la ciencia, sus raíces se remontan mucho más lejos en la historia del pensamiento humano. En cambio, en el curso de los setenta últimos años la

[2] A. Rey. *Le Retour éternel et la Philosophie de la physique*. Paris, Flammarion. 1927.

alianza entre teoría y observación ha transformado profundamente el pensamiento cosmológico imponiéndole cambios inesperados. ¿Quién hubiera imaginado que, como ya hemos hecho alusión en el tercer capítulo, podamos ser llevados a situar la «muerte térmica» del Universo no al final de su historia sino en su origen? La idea de que el orden que caracteriza nuestro Universo actual no es un orden superviviente a una progresiva degradación sino un orden producido a raíz de una explosión entrópica original y del que la radiación fósil nos permite evaluar su gigantesco coste, da la medida del camino recorrido.

¿En qué medida los conceptos físicos creados a propósito del mundo que hoy podemos observar —ya se trate de galaxias lejanas o de los sucesos provocados en los aceleradores gigantes— nos permiten construir una historia coherente que venga a dar en este Universo observable? Los «escenarios» para el nacimiento del Universo constituyen hoy un laboratorio de experimentación conceptual en el que los físicos inventan y ponen a prueba nuevos modelos de inteligibilidad. Los escenarios del Universo no son «legítimos» en el sentido del derecho, en el sentido en que los físicos habrían podido probar, contra el veredicto filosófico', que podían tratar el Universo como un objeto. Ellos son legítimos en el sentido científico porque crean un nuevo campo en el que se pone a prueba el diálogo entre teoría y experiencia, porque se caracterizan por la doble dinámica que es propia de la física, productora a la vez de nuevos datos más restrictivos y de hipótesis más exigentes.

Que en adelante la cosmología forme parte de la física no significa, sin embargo, que no plantee ningún problema conceptual. Todo lo contrario. Comencemos por el mismo Big Bang. Como veremos se trata de una consecuencia inevitable del «modelo standard» hoy dominante: según este modelo, si remontamos la evolución del Universo hacia el pasado llegaremos a una *singularidad*, a un punto sin extensión en el que se encuentra «concentrada» toda la energía y la materia del Universo. La singularidad asociada al Big Bang se ha impuesto gracias al éxito del modelo standard pero, curiosamente, ni este modelo ni la física en general nos permiten describirla: las leyes físicas no pueden aplicarse a un punto de densidad de materia y de energía infinita.

Pero la singularidad asociada al Big Bang remite a otro problema: ¿Cómo definir la diferencia entre un Universo «vacío» y nuestro Universo material? Desde el punto de vista de la relatividad, un Universo vacío de materia habría sido a priori perfectamente posible: en efecto, las ecuaciones de la relatividad general corresponden a la descripción de un Universo en el que la materia-energía está *dada* de una vez por todas. Esta es la razón de que la singularidad inicial sea una consecuencia inevitable del modelo standard: remontando hacia el pasado, siguiendo un Universo que se contrae de una manera regular, llegaremos fatalmente a un punto en el que la densidad de materia-energía se hace infinita.

La cuestión del Big Bang plantea de hecho la cuestión de origen de esta materia-energía en el seno de nuestro Universo. ¿Por qué algo y no nada? A esta pregunta, de la que algunos han afirmado que es la pregunta filosófica por excelencia y el abismo en que se diluye cualquier conocimiento positivo, trataremos de dar una respuesta en el interior de la física, respuesta que, veremos, está estrechamente ligada al problema del tiempo.

Ya en 1947 uno de nosotros había subrayado la novedad esencial de la física einsteniana, que hace del espacio y del tiempo no ya el marco indiferente de los fenómenos físicos sino un fenómeno en sí, para subrayar a continuación que «en esta construcción del tiempo a partir de los fenómenos, los fenómenos *irreversibles* jugarán ciertamente un papel fundamental» [3]. Podemos pensar hoy que la irreversibilidad juega en efecto este papel fundamental, y ello, no bajo la forma de esta «muerte térmica» que fue lugar común en el siglo XIX, sino, por el contrario, como un aspecto esencial del «paso a la existencia» de nuestro Universo.

De la forma que veremos, desaparecería en este caso la noción de un «origen absoluto» del Universo, que chocó a muchos físicos por su inquietante parecido con la noción teológica de Creación. El «paso a la existencia», hecho ahora físicamente inteligible, no sería ya, por la misma razón, un suceso único sino un proceso que responde a determinadas condiciones* Podría llegar a ser concebible que otros Universos hayan precedido al nuestro y puedan sucederle.

[3] I. Prigoaine. *Etude thermodynamique desphénomènes irréversibles*. Lieja, ed. Desoer, 1947. p. 136.

Antes de explorar las diferentes cuestiones que acabamos de presentar volvamos a esta física relativista portadora de la posibilidad, hasta entonces inconcebible, de «definir» el Universo, de constituirlo en objeto de ciencia. No entraremos en los detalles de la relatividad. Baste recordar que, contrariamente a la teoría newtoniana clásica, la teoría einsteniana no sitúa la materia en el seno de un espacio-receptáculo indiferente sino que describe una relación mutua entre la materia y las propiedades métricas del espacio-tiempo que la engloba.

¿Cómo entender esta «métrica» del espacio-tiempo? La física de Galileo y de Newton suponía ya una métrica. La estructura del espacio de la física clásica es *euclídea.* Ella permite definir la distancia entre dos puntos $s_{12}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$ como un invariante respecto a cambios de sistemas de coordenadas o, dicho de otra forma, respecto a observadores en movimiento relativo rectilíneo uniforme. El caracterizar tal estructura de «euclídea» señala el hecho de que se trata de una estructura particular correspondiente en este caso a un espacio de *curvatura nula.* Pueden definirse otros espacios. Por ejemplo, la superficie de una esfera, cerrada sobre sí misma, se caracteriza por una curvatura positiva, mientras que la de un «hiperboloide», abierta, tiene una curvatura negativa.

La teoría de la relatividad restringida de Einstein permanece ligada a una métrica caracterizada por una curvatura nula, como la del espacio euclídeo; de todas formas, esta métrica no incluye solamente el espacio sino también el tiempo. La relatividad restringida define un nuevo invariante, una nueva «distancia», esta vez ya no entre dos puntos en el espacio sino entre dos «sucesos» espacio-temporales. Diferentes observadores en movimiento rectilíneo y uniforme unos respecto a otros no podrán ponerse de acuerdo ni sobre la distancia entre dos sucesos ni sobre el tiempo que ha transcurrido entre ellos, pero sí sobre el «intervalo» espacio-temporal que les separa. El nuevo invariante es de la forma: $s_{12}^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2$. Esta magnitud es la que se conserva cuando se pasa de un observador inercial a otro. Lo que implica que cada observador verá un frente luminoso desplazarse en el vacío de tal modo que el intervalo s_{12}^2 se anula. En consecuencia, para todos estos observadores la velocidad de la luz tendrá el mismo valor c.

Con relación a este continuo cuadridimensional reinterpretó

Einstein la aceleración determinada por las fuerzas de interacción gravitacional. De la definición de curvatura en una región del Universo deriva la definición del movimiento de un «cuerpo de prueba» en esta región. Las aceleraciones que la física newtoniana explicaba en términos de interacción gravitatoria reflejan, para Einstein, la métrica del espacio-tiempo curvo, con el mismo título que el movimiento inercial refleja el caso particular de un espacio-tiempo «plano». El Universo en el que cualquier cuerpo de prueba tuviera un movimiento rectilíneo y uniforme sería un Universo de curvatura nula. Correspondería a un Universo *vacío de materia-energía*, el «Universo de Minkowski». En la teoría de Einstein es la materia la que determina la «curvatura» del espacio-tiempo. Las ecuaciones de Einstein describen así un espacio-tiempo que «reacciona» a la presencia de materia, y una materia «sensible» a la curvatura del espacio-tiempo. De manera más precisa, la ecuación fundamental de la relatividad general liga objetos matemáticos llamados «tensores»: el tensor *métrico*, que describe la curvatura del espacio-tiempo en una región dada del Universo, y el tensor «energía-impulso», que define el contenido material de esta región en términos de la densidad y de la presión que existe en dicha región.

El propio Einstein atrajo la atención sobre el significado diferente de los dos miembros de su ecuación. El la comparó a un edificio en el que un ala estaría construida de mármol y la otra de madera [4]. En efecto, la forma del tensor métrico está determinada por consideraciones teóricas muy precisas mientras que el tensor «energía-impulso», que representa la «fuente» de la curvatura del espacio-tiempo, es el resultado de una descripción fenomenológica y sólo toma una forma sencilla particular cuando exigimos que la ecuación de Einstein se reduzca, en el límite de campo débil, a la ecuación newtoniana de la gravitación.

Cualquier modelo cosmológico basado en las ecuaciones de la relatividad incorpora algunas hipótesis fenomenológicas respecto al contenido material del Universo. En particular, el modelo standard que ya hemos evocado y al que están asociados sobre todo los nombres de Lemaître, Friedmann, Robertson y

[4] A. Einstein. «Physik und Realität», en *Journ. Franklin Institut.*, vol. 221, 1936, pp. 313-347.

Walker, se basa en el «principio cosmológico» que supone que, a gran escala, el Universo puede definirse como homogéneo e isótropo. Este principio cosmológico permite definir un tiempo universal: todos los observadores que observan los mismos valores de las propiedades del Universo viven la misma edad de este Universo.

La historia que ha llevado al modelo standard es un ejemplo dramático de la intrusión del tiempo en un dominio del que parecía excluido por definición: ¿cómo pensar el Universo de otra manera que eternamente semejante a sí mismo? Ya en 1917, solamente un año después de la formulación de la teoría de la relatividad, Einstein propuso un primer modelo que, de hecho, hacía del Universo una entidad estática, cerrada sobre sí misma, una esfera de volumen finito, intemporal, verdadera encarnación del ideal de inteligibilidad que guió toda su vida. Es de notar que, para obtener esta solución de sus ecuaciones, Einstein tuvo que introducir en el segundo miembro de su ecuación un término suplementario llamado «constante cosmológica». Pero ya en 1992, Friedmann demostró que la solución estática propuesta por Einstein era inestable y la menor fluctuación destruiría su permanencia. En cambio, las ecuaciones de Einstein conducían de manera muy natural a soluciones que implican una dilatación o una contracción del Universo con el tiempo. Además, estas soluciones tenían la ventaja de no invocar la constante cosmológica cuya interpretación seguía siendo oscura.

En 1929, Hubble descubrió que la luz emitida por las galaxias está desplazada hacia el rojo en proporción a la distancia entre estas galaxias y la Tierra [5]. Este desplazamiento impuso la convicción de la mayoría de los físicos: el Universo en el que vivimos es un Universo en expansión. En efecto, el descubrimiento de Hubble puede explicarse por un movimiento de fuga de las galaxias, tanto más rápido cuanto más alejadas están, es decir, cuando la luz que recibimos de ellas ha sido emitida en un pasado más lejano.

Sin embargo, la expansión del Universo descrita por el modelo standard no debe confundirse con un «devenir» del

[5] Véase S. Weinberg. *Les Trois Premieres Minutes de l'Univers*. París, Seuil. 1978. Edición española: *Los tres primeros minutos del Universo* Alianza Editorial, Madrid, 1983.

Universo que crearía una diferencia intrínseca entre el pasado y el futuro. Los datos experimentales indican que nuestro Universo está actualmente en expansión, pero la ecuación de Einstein, junto con el principio cosmológico, admite otras soluciones. Según la densidad de materia-energía del Universo es posible que la expansión actual sea ilimitada en el tiempo, sin retorno, o bien que una fase de contracción suceda a la fase de expansión en la que nos encontramos. La evolución cosmológica que implica el modelo standard es entonces, al igual que la evolución dinámica clásica, intrínsecamente reversible y determinista.

No obstante, y contrariamente a la evolución puramente dinámica, la evolución que describe el modelo standard integra también un elemento termodinámico. A medida que aumenta el radio del Universo no solamente disminuye la densidad de materia-energía sino que también desciende su temperatura. Sin embargo, este progresivo enfriamiento del Universo, si bien juega, como veremos, un papel esencial en los recientes desarrollos de la cosmología, se describe también como esencialmente reversible, es decir, completamente determinado por la evolución geométrica. Dicho de forma más precisa, la evolución cosmológica definida por el modelo standard es adiabática, es decir, conserva la entropía del Universo.

Volvamos ahora al problema del Big Bang. Si remontamos la expansión adiabática hacia el pasado encontraremos una estructura del espacio-tiempo con curvatura cada vez mayor, una densidad y una presión de la materia que lo constituye cada vez más elevada. En el límite —y las medidas actuales de la velocidad de fuga de las galaxias permiten situar este límite hace quince mil millones de años— llegamos a la situación *singular* que ya hemos mencionado, en la que la densidad, la temperatura y la curvatura toman un valor infinito.

La ciencia y los mitos parecen unirse aqui en el misterio del origen. ¿Qué es el Big Bang? ¿Se trata de un suceso único? En este caso, ¿cómo podría ser estudiado, por la física? Esta sólo puede tratar clases de fenómenos cuyas condiciones de producción define. Ciertamente, ya lo hemos dicho, ningún «lanzamiento de dado», ningún comportamiento caótico individual es, estrictamente hablando, reproducible. Sin embargo podemos repetir un lanzamiento de dados, podemos preparar un sistema con comportamiento caótico: podemos definir así dichos com-

portamientos individuales como pertenecientes a una clase que sí es objeto de ciencia. El Big Bang no pertenece a ninguna clase de sucesos sino que constituiría una singularidad absoluta.

Seguramente algunos han quedado satisfechos al ver en la singularidad asociada al Big Bang la «mano de Dios», el triunfo del relato de la creación bíblica, el acto único, fuera de la ciencia, del que sólo podemos reconstituir su existencia a partir del mundo que conocemos. Otros han intentado evitar esta situación inquietante. Una de las tentativas más notables en este sentido fue el modelo cosmológico del *«steadystate Universe»* de Bondi, Gold y Hoyle[6].

El modelo del *«steady state Universe»* supone el principio cosmológico «perfecto». Si en el Universo del modelo standard todos los observadores contemporáneos veían el mismo Universo, en éste no solamente no hay lugar privilegiado sino que tampoco hay tiempo privilegiado. Cualquier observador, en el pasado y en el futuro, atribuiría al Universo los mismos valores de temperatura y de densidad de materia. El Universo no tiene edad. El modelo del *«steady state Universe»* describe de hecho una expansión exponencial del Universo *acoplada a una permanente creación de materia.* La sincronización entre expansión y creación permite mantener en el Universo una densidad constante de materia-energía. Se trata así de un Universo eterno, sin edad, pero en estado de continua creación.

Una consecuencia del modelo del *«steady state Universe»* ha sido poco subrayada: es cierto que este modelo elimina la consecuencia más notable del modelo standard, la posibilidad de definir una «edad» del Universo; pero la adición, en el segundo miembro de la ecuación de Einstein, de un término que corresponde a la creación de materia implica por otra parte que la evolución cosmológica ya no es conservativa en sentido termodinámico. La relación de mutua implicación entre creación y expansión define una flecha del tiempo, una irreversibilidad intrínseca que es la de la creación de materia, es decir, también de entropía.

El Universo de Einstein no tenía edad ni flecha del tiempo; el del modelo standard tiene una edad pero no flecha del tiempo; el

[6] Véase H. Bondi, *Cosmology*, Cambridge, University Press. 1960. Hay edición española: *Cosmologia*, Labor, Barcelona, 1977.

del *steady state* tiene una flecha del tiempo pero no edad. El modelo que nosotros vamos a proponer es el de un Universo que tiene a la vez edad y flecha del tiempo. Pero no nos anticipemos. Volvamos antes al descubrimiento experimental que impuso a la mayoría de los físicos la convicción de que no solamente el Universo está en expansión sino que también tiene una edad y, por consiguiente, un origen.

Fue, como hemos dicho, en 1965 cuando el descubrimiento por Penzias y Wilson de la radiación fósil hizo de la hipótesis del Big Bang —y, con ella, de la noción misma de modelo cosmológico— no ya solamente una curiosidad matemática sino un auténtico problema físico [7]. Esta radiación había sido predicha teóricamente, sobre la base de la idea de Big Bang, por Gamow, Alpher y Hermán ya en 1948. Estos avanzaron que si el Universo en el pasado fue muchísimo más denso y más caliente que hoy, y si la historia de su expansión es al mismo tiempo la de su enfriamiento progresivo, debió ser opaco al principio cuando los fotones tenían suficiente energía para interaccionar con la materia. A la temperatura de 3.000° K se habría roto el equilibrio entre materia y luz, nuestro Universo se habría hecho transparente y los fotones ya no tuvieron otra historia que la de su enfriamiento y la dilatación de la longitud de onda. Lo que calcularon Gamow, Alpher y Hermán fue la longitud de onda que deberían tener hoy estos fotones y esto fue lo que confirmó la medida de la radiación «fósil» de 2.7° K.

El descubrimiento de Penzias y Wilson determinó el triunfo del modelo standard y el abandono del modelo rival de Hoyle. Por supuesto, la radiación fósil no nos hace remontar hasta la misma singularidad original sino a 300.000 años más tarde, al final del Big Bang que señaló el desacoplamiento entre materia y luz. No obstante, para la mayoría de los especialistas ello implica que el Universo tiene ciertamente un origen y una edad.

El modelo standard constituye el telón de fondo de los estudios astrofísicos actuales relativos a la formación y a la evolución de las galaxias y de las estrellas. Se admite generalmente que las teorías físicas actuales permiten entender lo que fue nuestro Universo con apenas un segundo de existencia. Lo que fue el Universo durante su primer segundo de existencia

Véase S. Weinberg, *op. cit.*, y H. Pagels. *Perfect Symmetry*, *op. cit.*

constituye un campo de exploración conceptual para la física de altas energías. No es yendo hacia lo infinitamente pequeño sino hacia lo infinitamente grande -es decir, hacia comportamientos que serían propios de la materia en los primeros instantes del Universo— como los físicos esperan hoy descubrir los principios que permitirían unificar la prodigiosa multiplicidad de las partículas elementales. Las partículas que se materializan en los sucesos más energéticos que pueden producir nuestros aceleradores existían, se cree, cuando el Universo tenía menos de una millonésima de segundo. Pero las teorías actuales sobre la unificación de tres tipos de interacción —débil, electromagnética y fuerte— nos remiten a un Universo ya «viejo», con una edad aproximada de 10^{-34} segundos. Para observar las partículas que existían en esta época necesitaríamos aceleradores circulares cuyo diámetro tendría el tamaño de nuestra galaxia [8].

Sin embargo, el modelo standard también encuentra dificultades. Para resolverlas se han propuesto recientemente «mejoras» a este modelo, tales como el modelo «inflacionario» [9]. Este modelo incluye lo que realmente constituiría un «segundo nacimiento» del Universo, alrededor de 10^{35} segundos después del Big Bang propiamente dicho. Se trataría de una etapa fuertemente disipativa, bastante parecida a una transición de fase, por ejemplo a la brusca cristalización de un líquido a una temperatura inferior a su temperatura de cristalización. En este caso —aunque no entraremos en detalles—, esta transición caracterizaría la ruptura de simetría entre interacciones fuertes, por un lado, y débiles y electromagnéticas, por otro. Iría acompañada de una gigantesca expansión (de un factor 10^{50} en un intervalo de tiempo de 10^{-32} segundos) seguida de un calentamiento brutal.

No nos entretendremos en el modelo inflacionario que, a su vez, plantea problemas difíciles. Por ejemplo, obliga a introducir en las ecuaciones de Einstein un término suplementario, la famosa «constante cosmológica» [10]. En la medida en que las

[8] Véase S. Weinberg, op. cit., y también G. Cohen-Tannoudji y M. Spiro. *La Matière-Espace-Temps*, París, Fayard. 1986. Edición española: *La materia-espacio-tiempo* Espasa Calpe, Madrid, 1988.

[9] R.H. Brandenberger, «Quantum Field Theory Methods and Inflationary Models», *Rev. Mod. Phys.*, vol. 57, p. 1. 1985 y A.D. Linde. «The Inflationary Universe», *Rep. Progr. Phys.*, vol. 47. p. 925. 1984.

[10] Véase R. Brout y P. Englert. «Cosmologie quantique». en *Aux confins de l'Univers. Faut-il croire au Big Bang?*, ed. J. Schneider, París, Fayard. 1987

observaciones actuales parecen excluir la existencia de tal constante sería preciso aceptar que ha desaparecido sin que hasta ahora se haya propuesto ninguna razón que justifique esta desaparición. Pero, sobre todo, el modelo inflacionario no aporta solución a las cuestiones que hemos planteado al comienzo de este capítulo. Deja intacto el problema de la singularidad inicial y se limita a describir un «accidente» causado por un retardo en la adaptación del Universo a su propio enfriamiento. Ciertamente, este accidente es fuertemente disipativo pero desgrana una historia cosmológica que sigue concibiéndose como esencialmente adiabática. Como veremos, el modelo que vamos a introducir supone también una etapa inflacionaria disipativa, pero evita el Big Bang y une de manera intrínseca irreversibilidad y creación del Universo.

Detendremos aquí esta descripción muy esquemática de la cosmología contemporánea para dirigirnos a la nueva aproximación que proponemos.

Como ya hemos subrayado, la mayor dificultad del modelo standard es su carácter adiabático, intrínsecamente reversible. La hipótesis de una evolución adiabática era natural mientras los modelos de Universo permanecían dominados por la geometría. Ella no lo es ya en el contexto actual. Hemos visto en el capítulo 3 de este libro que el Universo salido del Big Bang, en el que existen alrededor de 10^8 fotones por cada partícula material, evoca irresistiblemente un suceso fuertemente entrópico, productor a la vez del «orden» de las partículas y de la disipación fotónica. La entropía del Universo reside esencialmente en estos fotones. Se ha calculado recientemente que si la totalidad del Universo «material» se desmaterializa en forma de fotones, ello sólo modificaría la entropía del Universo en un 0,01%. ¿Cómo entender esta gigantesca cantidad de entropía? Parece paradójico el describir la evolución de nuestro Universo rico en entropía en términos de una evolución adiabática que conserva la entropía. En un momento dado un mecanismo creador de entropía ha debido jugar un papel esencial.

Pero planteémonos primero la cuestión: «podría una génesis de nuestro Universo material ser compatible con las leyes físicas? ¿No debería tratarse de una creación *ex nihilo*, exterior por definición a estas leyes? Aqui necesitamos recordar una concep-

ción hoy día muy extendida que haría del Universo un *«free lunch»*, un suceso gratuito.

Esta hipótesis, propuesta en 1973 [11] por Tryon, retomaba una antigua idea de Jordán. En su autobiografía [12], Gamow cuenta el estupor de Einstein cuando le habló de la observación de Jordán: se podría admitir que la energía total de nuestro Universo es nula. En efecto, en el Universo la energía se encuentra bajo dos formas: la energía ligada a la gravitación, que es una fuerza de atracción, y la energía ligada a la masa por la famosa fórmula de Einstein, $E = mc^2$. Ahora bien, en el balance, la energía ligada a la gravitación aparece con un signo negativo mientras que la que está ligada a la masa tiene un signo positivo. Desde este punto de vista, se podría afirmar que no hay diferencia energética entre nuestro Universo y un Universo vacío, el Universo de Minkowski al que ya hemos hecho alusión: un balance energético nulo puede resultar tanto de la suma de dos ceros (Universo vacío) como de la suma de dos cantidades iguales y de signos opuestos (Universo material). En otros términos, desde el punto de vista de la energía no habría que pagar ningún precio para pasar de la no-existencia a la existencia.

El Universo, concluía Tryon, podría ser simplemente otra expresión de la nada y, por ello, podría surgir espontáneamente de esta nada: su creación *ex nihilo* no supone de hecho ninguna contradicción desde el punto de vista energético. El nacimiento del Universo estaría entonces asociado a una fluctuación espontánea del vacío.

La idea del Universo como fluctuación del vacío recuerda curiosamente a la idea de Boltzmann que hemos citado en el primer capítulo de este libro: el Universo como fluctuación respecto al equilibrio termodinámico. No obstante, se enfrenta al mismo problema: ¿por qué no observamos tales fluctuaciones sino sólo un Universo que existe desde hace quince mil millones de años? Aquí es donde volvemos a encontrar el problema de la irreversibilidad. Pensemos en los magníficos vórtices de Bénard: desde el punto de vista de la energía corresponden igualmente a

[11] E.P. Tryon, *Nature*, vol. 246, p. 396, 1973.

[12] G. Gamow, *My World Line: An Informal Autobiography*, New York, Víking Press, 1970.

un *«freelunch»*. Pero la conservación de la energía no basta para explicar su paso a la existencia. Es la entropía, no la energía, la que permite evaluar el precio con que se paga su existencia.

El problema del origen del Universo aparece así en una nueva perspectiva. La irreversibilidad no seria una propiedad sobreañadida, marcando una desviación entre la evolución real del Universo y el ideal de una evolución adiabática, como sucede en el modelo inflacionario. Sería la expresión esencial de la génesis del Universo. No sería la energía sino la entropía la que marcaría la diferencia entre el Universo puramente espacio-temporal, vacío de Minkowski y nuestro Universo material. Las visiones tradicionales de un Universo condenado a la muerte térmica se enfrentaban a una dificultad fundamental: ¿cómo entender el estado inicial, fuertemente ordenado, y por consiguiente improbable a priori, cuya progresiva desaparición manifestaría la historia del Universo? La idea de una creación irreversible de materia responde a este problema: el Universo puramente geométrico, espacio-temporal, corresponde a un estado coherente que destruye la creación entrópica de la materia. La «muerte térmica» se sitúa en el origen, en el momento en que se ha roto la simetría espacio-temporal del Universo vacío y en el que, rasgando el «tejido espacio-temporal» liso, ha aparecido la materia y, con ella, la entropía.

Un suceso tal debería corresponder a una inestabilidad de un espacio vacío original. Como veremos, existe hoy un escenario que sustituye la hipótesis de una singularidad por un mecanismo creador a la vez de partículas masivas y de la curvatura del espacio-tiempo. Sin embargo, antes de describir este escenario subrayemos las consecuencias generales de una creación de materia semejante.

Esta creación implica una modificación de las ecuaciones cosmológicas de Einstein (ver también el Apéndice III). En efecto, estas ecuaciones, que están en la base del modelo standard, describen una evolución adiabática y reversible: ningún flujo de calor procedente del «exterior» hace variar la entropía del Universo ($d_eS = 0$) y éste no es sede de ningún proceso productor de entropía ($d_iS = 0$). En cuanto a la conservación de la energía, es decir, al primer principio de la termodinámica, su formulación usual es $dE + pdV = dQ$ donde E es la energía interna, p la presión, V el volumen y dQ el calor

recibido: en el caso adiabático ($dQ = 0$), esta ecuación se reduce a $dE + pdV = 0$. La eventual creación de materia nos obliga a reformular los dos principios de la termodinámica. Necesitamos. por una parte, añadir a la ecuación $dE + pdV = 0$ un término fuente de energía interna que refleje esta creación y sea, por lo tanto, proporcional a dN, la variación del número de partículas: por otra parte, este término debe escogerse de manera que el segundo principio corresponda ahora a una producción de entropía, positiva o nula, debida a la creación de materia: $d_iS = sdN$, donde s es la entropía por partícula creada. Esta transformación repercute sobre la ecuación de Einstein en la que se traduce por la aparición de una presión suplementaria (ver Apéndice III). Cuando se anula la producción de materia dN, y por consiguiente la producción de entropía, se vuelven a encontrar las ecuaciones habituales [13].

La cosmología einsteniana había integrado ya el espacio-tiempo y la materia, pero de ésta sólo había retenido su definición newtoniana en términos de masas e interacciones. Esta es la razón por la que, en esta cosmología, la flecha del tiempo pasaba inadvertida. En la perspectiva presentada ahora, se trata de una aproximación válida solamente cuando la génesis del Universo está acabada, es decir, tras un período cuya estimación permite el escenario que vamos a presentar ahora.

Vayamos pues a esta fase inicial que vio «rasgarse» el tejido coherente del espacio-tiempo, a estos primeros instantes del Universo que integran de manera indisoluble geometría, expansión e irreversibilidad.

La búsqueda de unificación en física tiene varios aspectos. Acabamos de subrayar la conexión entre geometría y disipación, pero el origen del Universo plantea igualmente el problema de la unificación de las interacciones. En efecto, independientemente de la singularidad del Big Bang propiamente dicho, el Universo primordial nos remite a la «era cuántica» a propósito de la que Cohen-Tannoudji y Spiro [14] han reclamado la necesidad de una «tercera cuantificación» que integre la física de las partículas, que hace jugar un" papel esencial a las constantes c y h, y la

[13] I. Prigogine, J. Geheniau, E. Gunzig y P. Nardone, por publicar.

[14] *La Matière-Espace-Temps, op. cit.*, conclusión; véase también R. Brout y F. Englert, *Cosmologie Quantique, op. cit.*

relatividad general que, además de c, implica otra constante, la constante de acoplamiento gravitatorio G.

Esto nos lleva a introducir unidades «naturales» de longitud, tiempo y temperatura expresadas únicamente con la ayuda de tres constantes universales c, G y h. Estas son las «unidades de Planck». Por ejemplo, la longitud de Planck $(G\hbar/c^3)^{1/2}$, corresponde aproximadamente a 10^{-44} segundos, y la temperatura de Planck del orden de 10^{32} grados.

Vemos que la escala definida por estas unidades nos remite a lo que fue el Universo en la vecindad inmediata a la singularidad asociada al Big Bang. La descripción de un Universo cuyo radio es del orden de 10^{-33} centímetros debe incorporar a la vez la mecánica cuántica y la relatividad. Por ello, mientras los físicos no dispongan de teorías unificadas capaces de integrar las tres constantes universales, es decir, el mundo cuántico y el mundo gravitatorio, los modelos que atañen a los primeros instantes del Universo seguirán siendo solamente fenomenológicos.

Sin embargo, la escala de Planck nos permite ya sacar una conclusión bastante notable relativa a los «objetos» que han podido poblar el Universo antes del límite fatídico definido por esta escala. De hecho, podemos igualmente definir una masa en términos de las tres constantes universales. Ahora bien, curiosamente, esta «masa de Planck» es grande comparada con la masa típica de una partícula elemental: es del orden de 10^{-5} gramos mientras que la masa del protón, por ejemplo, es del orden de 10^{-23} gramos. La masa de Planck corresponde así a la de un inmenso número de protones (10^{18}). ¿Cómo concebir una partícula elemental tan monstruosa? Varias razones llevan a pensar que se trate de mini-agujeros negros.

Cuando se piensa en un agujero negro [15] se piensa generalmente en un objeto astrofísico extraordinariamente denso. Tales objetos son los que los astrónomos tratan de detectar, especialmente en el interior de las galaxias, a partir de las perturbaciones que deberían provocar en su entorno. Sin embargo, cualquier cuerpo masivo, estrella o partícula elemental, puede ser caracterizado por la misma magnitud que permite definir un agujero negro, esto es, su «radio de Schwarzschild». El radio de Schwarzschild de un cuerpo define una esfera que, si toda la masa

Para lo que sigue véase J.P. Luminet, *Les Trou Noirs,* Paris, Belfond, 1987.

del cuerpo en cuestión estuviese allí concentrada, determinaría una curvatura del espacio-tiempo tal que ni siquiera la luz podría escapar de ella. Normalmente el radio de Schwarzschild es mucho más pequeño que el radio de un cuerpo masivo. Por ejemplo, el radio de Schwarzschild del Sol es de 1 kilómetro, y el de la Tierra, de 1 centímetro. Cuando es mayor es cuando tenemos un agujero negro. El radio de Schwarzschild define entonces la «zona de captura» de un agujero negro. Incluso un fotón en el interior de esta zona quedaría atrapado por el agujero negro. Una partícula elemental que tuviera la masa de Planck tendría un radio de Schwarzschild que sería exactamente igual a su radio «de Compton», es decir, a la definición que la mecánica cuántica da de su tamaño (este radio es igual a $\lambda = h/mc$ donde m es la masa de la partícula). La masa de Planck define así el umbral a partir del cual las partículas elementales son mini-agujeros negros *.

¿Cómo concebir un mini-agujero negro? Sin entrar en detalles señalemos que nuestra concepción de los agujeros negros ha sido renovada como consecuencia de los trabajos de Hawking y Bekenstein especialmente[16]. Estos han mostrado que, desde el punto de vista cuántico, es imposible que los agujeros negros atrapen definitivamente la materia-energía. Las relaciones de incertidumbre cuántica llevan a predecir un «efecto túnel» a través de la barrera gravitatoria, la posibilidad de que partículas y fotones escapen del agujero negro. Este se ha convertido ahora en objeto termodinámico caracterizado por el espectro energético de su radiación, es decir, por una temperatura y una entropía. Hawking ha demostrado que la temperatura de radiación era tanto más alta, y la entropía tanto más baja, cuanto más pequeña era la masa del agujero negro. Un agujero negro «pequeño» es capaz de emitir partículas masivas mientras que un agujero negro con la masa del Sol emitiría esencialmente partículas sin masa. Consiguientemente, la duración de la vida de un agujero negro aumenta con su masa (más exactamente con el

[16] S. Hawking, *Comm. Math. Phys.*, vol. 43. 1975. p. 199; J. Bekenstein. *Physical Review*, vol. DI2, 1975. p. 3077.

* El radio de Schwarzschild de un cuerpo de masa m es $R_s = 2Gm/c^2$. Entonces, para un cuerpo con la masa de Planck $m = (hc/G)^{1/2}$ su radio de Schwarzschild y su radio de Compton son del orden de la longitud de Planck [N. del T.]

cubo de su masa). Un agujero negro «solar» viviría 10^{66} años, mientras que un agujero negro que tuviera la masa de Planck desaparecería en un tiempo del orden del tiempo de Planck.

La concepción de un «mini-agujero negro» caracterizado por las dimensiones de Planck nos da una indicación preciosa: las criaturas del Universo primordial serían esencialmete disipativas, caracterizadas por una entropía extremadamente alta. Ahora bien, según el escenario que vamos a describir ahora de manera esquemática, sólo las «partículas» con una masa de alrededor de cincuenta veces la masa de Planck, es decir, mini-agujeros negros, han podido desgarrar el tejido del espacio-tiempo correspondiente al vacío.

Este escenario, propuesto originalmente por Brout, Englert y Gunzig [17], y continuado por Gunzig y Nardone [18], tiene como punto de partida el estudio del Universo de Minkowski, es decir, de un Universo vacío, de curvatura nula. Pero el «vacío» está aquí definido desde el punto de vista de la mecánica cuántica. El vacío cuántico es lo contrario de la nada: lejos de ser pasivo e inerte contiene en potencia todas las partículas posibles. Estas partículas surgen del vacío incesantemente para desaparecer al momento. Las «fluctuaciones cuánticas del vacío» no están, de hecho, sujetas a la conservación de la energía pero su actualización, la transformación de partículas virtuales en partículas reales, necesita una energía equivalente a la masa de estas partículas. Esta es la razón de que en nuestro Universo templado sólo observamos la materalización de las partículas más ligeras: fotones de alta energía, como los de los rayos cósmicos, pueden «suscitar» la creación de pares electrón-positrón. En los aceleradores pueden materializarse partículas mucho más masivas.

Curiosamente, las fluctuaciones del vacío cuántico pueden provocar la inestabilidad del Universo (vacío) de Minkowski. Si una partícula virtual de masa superior a un determinado umbral (aproximadamente cincuenta veces la masa del protón) aparece, ella desencadenará un mecanismo cooperativo fuertemente no

[17] R. Brout. F. Englert y E. Gunzig. *Ann. Phys.*, vol. 115, p. 78, 1978 y *Gen. Rel. Gravit.*, vol. 10. p. 1. 1979: R. Brout et al., *Nucl. Phys. B.* vol. 170, p. 228, 1980.

[18] E. Gunzig y P. Nardone, *Phys. Letter B,* vol. 188, p. 324, 1982 y vol. 134, p. 412. 1984. y «Self-Consistent Cosmology, the Inflationary Universe, and all that...» en *Fundamentáis of Cosmic Physics,* vol, 11, p. 311, 1987.

lineal. Este mecanismo da su sentido físico a la teoría del *«free lunch»*. El extrae de la reserva de energía negativa que constituye la energía geométrica del espacio-tiempo descrito por las ecuaciones de Einstein la energía positiva necesaria para la materialización de las partículas virtuales. Esta transformación de la energía negativa del campo gravitatorio en energía positiva de materia tiene como consecuencia una curvatura del espacio-tiempo que, a su vez, arrastra la materialización de otras partículas, etc. El Universo que conocemos habría nacido así de la amplificación de una fluctuación que «desgarra» el espacio-tiempo de Minkowski, de una producción irreversible de partículas masivas y de la curvatura del espacio-tiempo.

Esta descripción hace pensar en la de la cristalización de un líquido sobreenfriado, líquido a una temperatura inferior a su temperatura de cristalización. En tal líquido se forman pequeños gérmenes cristalinos, pero estos gérmenes aparecen y luego se disuelven sin consecuencias. Para que un germen desencadene el proceso que llevará a la cristalización total del líquido es preciso que tenga un tamaño crítico que depende, también en este caso, de un mecanismo cooperativo fuertemente no lineal, el proceso de «nucleación».

El modelo muestra que mientras continúa la producción de partículas el Universo conoce una expansión de tipo exponencial con densidad constante (en términos técnicos se trata de una fase inflacionaria «de Sitteriana»). Tal expansión resuelve los problemas por los que había sido concebido el modelo inflacionario que hemos comentado previamente, pero sin levantar las mismas dificultades. En particular, no implica la introducción de una constante cosmológica. La producción de partículas y la inflación terminarían con la «desintegración» de las partículas masivas creadas. Ahora bien, como ya hemos visto estas partículas deberían ser mini-agujeros negros de una duración de aproximadamente 10^{-37} segundos. Esta sería la «duración» del nacimiento de nuestro Universo, es decir, la duración durante la que se habría producido la casi totalidad de la entropía del Universo. medida por la entropía de los agujeros negros creados. Con la evaporación de los agujetos negros comenzaría la evolución de tipo adiabático que describe el modelo standard (ver *fig. 20).*

De este modo, el nacimiento de! Universo correspondería a una inestabilidad que nos hace pasar del Universo vacío a un

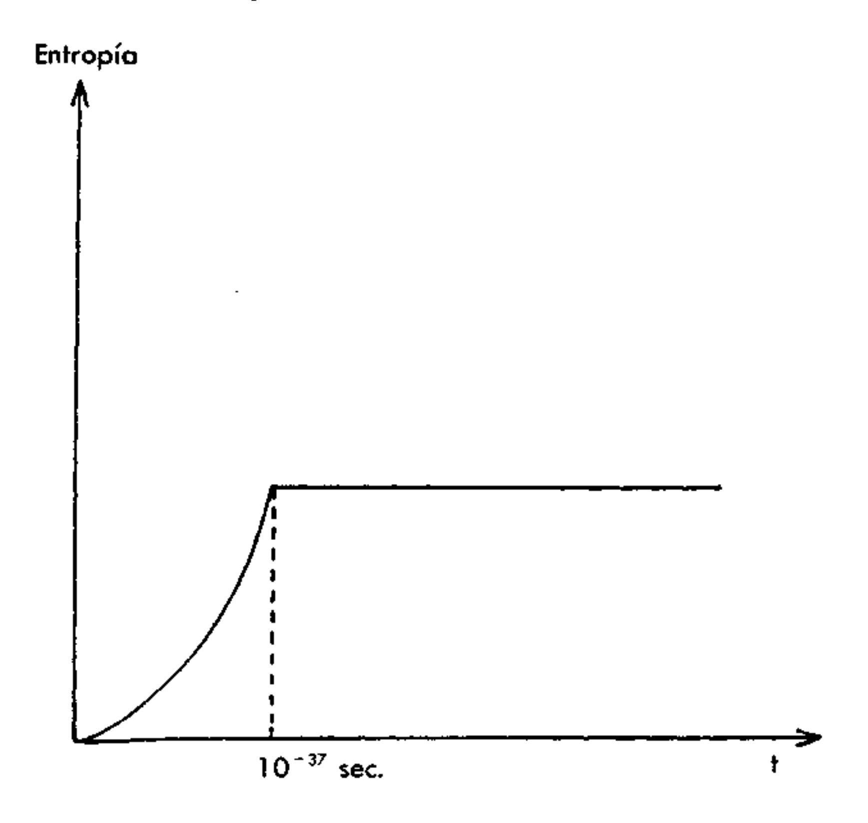


Figura 20.—*Evolución de la entropía del Universo en el curso del tiempo: el Universo «vacío» de Minkowski corresponde (por convención) a un valor nulo de la entropía: el comienzo de la desviación respecto al valor nulo corresponde a la inestabilidad. Inmediatamente se inicia una fase de crecimiento exponencial de la entropía seguida de la fase adiabática (de entropía constante) que describe el modelo standard.*

Universo en expansión exponencial (Universo de de Sitter) poblado de mini-agujeros negros. Con la muerte de estos agujeros negros que engendran la materia y la radiación, la expansión exponencial se transforma en una expansión adiabática, la del modelo standard, que todavía continua.

En esta concepción no hay ya singularidad inicial, no hay Big Bang, sino una inestabilidad creadora de materia. Hemos descrito un posible mecanismo que da lugar a una inestabilidad

semejante pero la conclusión general, desarrollada más en detalle en el Apéndice III, es que *todo mecanismo de inestabilidad disipativo, que crea materia, suprime el Big Bang.* El Big Bang es *estructuralmente inestable.* Este es un resultado fundamental.

La inestabilidad estructural es un fenómeno muy general. Lo hemos encontrado ya en el capítulo 4 a propósito de la modificación radical que la introducción del más pequeño término de fricción impone al comportamiento del péndulo ideal. Del mismo modo, la historia del Universo se modifica radicalmente por la introducción de una creación disipativa de materia por pequeña que sea.

Volveremos sobre estas cuestiones en el Apéndice III. Señalemos aquí que las condiciones de paso del Universo en expansión exponencial al Universo en expansión adiabática permite algunas predicciones que están de acuerdo con la descripción del Universo actual[19]. El cálculo de la entropía de los agujeros negros creados durante los 10^{-37} segundos del paso a la existencia de nuestro Universo permite, a partir del valor de las tres constantes universales, una evaluación correcta de los datos que caracterizan la estructura termodinámica de nuestro Universo actual: la entropía (medida por el número de fotones en el Universo) y sobre todo la relación entre el número de partículas masivas y el de los fotones que constituyen este Universo.

¿Cómo entender el carácter irreversible del nacimiento de la materia a partir del espacio-tiempo? ¿Por qué está excluido un escenario inverso, en el que las partículas se desharían mientras se anulaba la curvatura del espacio-tiempo? En el escenario que acabamos de presentar, la creación del Universo se acompaña de un descenso de la energía gravitatoria. Por definición, el vacío cuántico corresponde a un estado energético fundamental de valor nulo. La creación del Universo material da entonces un valor negativo al estado que corresponde a la curvatura del espacio-tiempo que tiene lugar consiguientemente. La situación es curiosamente similar a la del átomo excitado que hemos analizado en el capítulo anterior. Podemos comparar el Universo vacío de Minkowski a un estado «excitado» del Universo. De la misma forma que el átomo excitado vuelve a su estado

[19] E. Gunzig, J. Geheniau, I. Prigogine, «Entropy and Cosmology», *Nature* vol. 330, 1987, p. 621.

fundamental emitiendo un fotón, el Universo vacío llega a un estado espacio-temporal, que corresponde a una energía más baja, «radiando» materia y curvándose. Y esta transferencia energética unidireccional, que sólo puede tener lugar desde la energía gravitatoria hacia la energía de materia, y no al revés, implica un Universo en expansión.

El sueño de Einstein había sido el de concebir una geometría susceptible de unificar las leyes físicas y reducir el conjunto de los procesos físico-químicos a esta verdad geométrica fundamental. Einstein nos ha permitido pensar la unidad indisociable del espacio-tiempo y la materia. Sin embargo, esta unidad no significa equivalencia. En la perspectiva que aquí presentamos, la creación de la materia, definida como portadora de la entropía, no es reducible a un fenómeno reversible de la misma forma que el átomo cuántico excitado no es reducible a la mecánica. Se alumbra un nuevo tipo de coherencia que ofrece cierta analogía con el Universo del *steady state*, en cuanto que la expansión y creación de materia aparecen como inseparables, pero que distingue el período de expansión irreversible de la creación del Universo y el período de expansión sin creación que corresponde a las ecuaciones cosmológicas de tipo Friedmann-Lemaitre.

Hemos titulado este capítulo «El nacimiento del tiempo». Evidentemente esto es una manera de hablar. De lo que hemos descrito el nacimiento es del tiempo de nuestro Universo. Sabemos que nuestro Universo tiene un «tiempo», una «edad», pero, ¿podemos asociar este tiempo a *el* tiempo, este nacimiento a un «nacimiento del tiempo»? Nada de eso. Nuestra concepción del «vacío cuántico original» implica en sí misma un tiempo irreversible latente, el que presuponen las fluctuaciones de este vacío. La situación es semejante a la que hemos encontrado a propósito de los estados de equilibrio. Como hemos visto, las condiciones de no-equilibrio no crean la flecha del tiempo sino que permiten a esta flecha del tiempo, siempre presente en la dinámica de las correlaciones post-colisionales, manifestarse en el nivel macroscópico. Análogamente, la flecha del tiempo de nuestro Universo no es creada sino actualizada por la fluctuación que desencadena el nacimiento de este Universo. El tiempo precede a la existencia.

La expresión más chocante de la simetría esencial del modelo standard era la posibilidad que abría de un Eterno Retorno, de una sucesión eterna de fases de expansión y contracción, otra formulación del ideal de eternidad estática que fue el de Einstein. Esta posibilidad queda excluida a partir de ahora puesto que es solamente la expansión sin creación de materia la que es reversible, pero no lo es la que marca la fase inicial —de creación— de nuestro Universo. Sin embargo, como hemos señalado en el segundo capítulo, el Eterno Retorno no significa forzosamente reversibilidad. Las estaciones se repiten pero es inconcebible que tras la primavera venga el invierno y luego el otoño. Quizá podamos ver como se esboza un modelo cosmológico de este Eterno Retorno intrínsecamente irreversible: en efecto, en la medida en que el nacimiento del Universo responde a partir de ahora a un modelo físico, ya no se trata de un suceso único sino de un suceso capaz de reproducirse si se reproducen sus condiciones de posibilidad.

Retomemos la cuestión de la evolución cosmológica desde el punto de vista de la densidad de materia-energía n en función del tiempo.

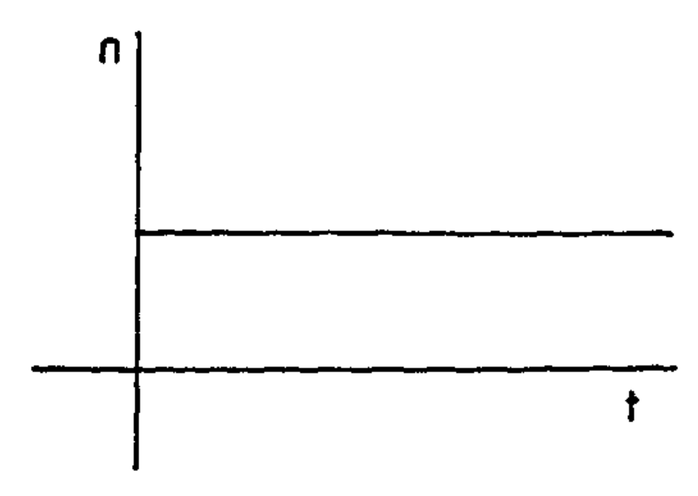


Figura 21.—*Evolución temporal de la densidad de materia-energía en el «steady state Universe». EL origen de tiempos es arbitrario.*

En el *«steady state Universe»,* n sería constante en el tiempo pues la expansión del Universo compensa la creación de materia *(fig.21).* De esta forma no hay instante inicial en este caso. Es el reino de la eternidad como lo quiere el principio cosmológico perfecto.

En el modelo standard no hay creación de materia y la densidad disminuye, por lo tanto, con la expansión del Universo *(fig. 22).*

Cuando hay inestabilidad la densidad aumenta al principio, alcanza un valor estable (correspondiente a un Universo de de Sitter en el que la creación y expansión se compensan) y luego disminuye como en el modelo standard *(fig. 23).*

Vemos, sin embargo, que la disminución de la densidad de

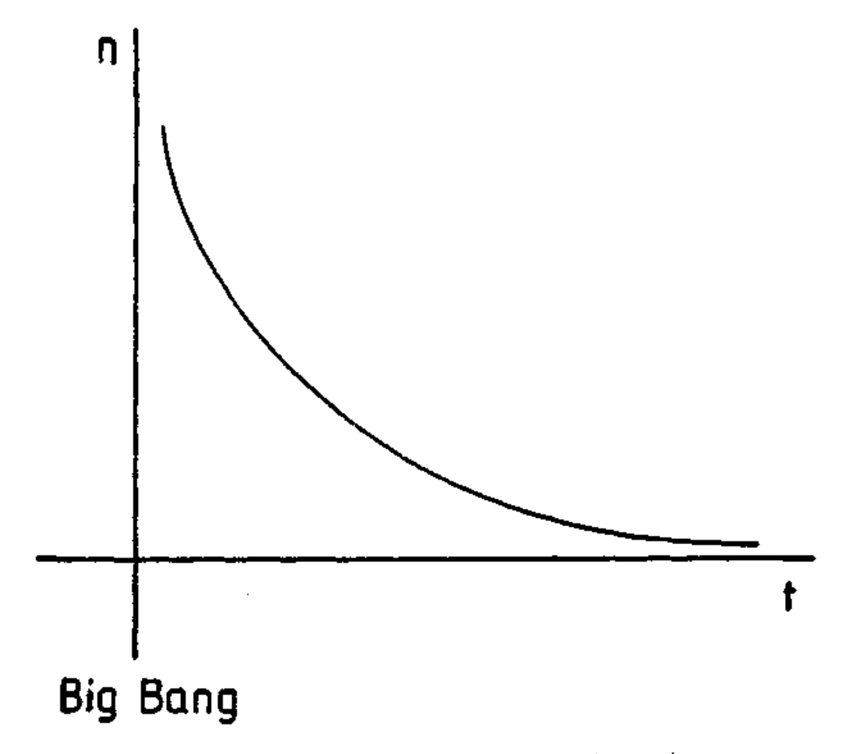


Figura 22.—*Evolución temporal de la densidad de materia-energía en el modelo standard.*

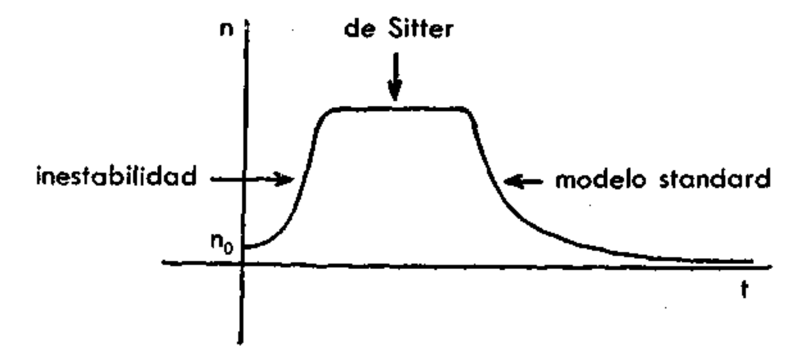


Figura 23.—*Evolución temporal de la densidad de materia-energía en un Universo que comienza a partir de una inestabilidad. El valor atribuido a la fluctuación inicial, n_0, y las unidades son arbitrarios.*

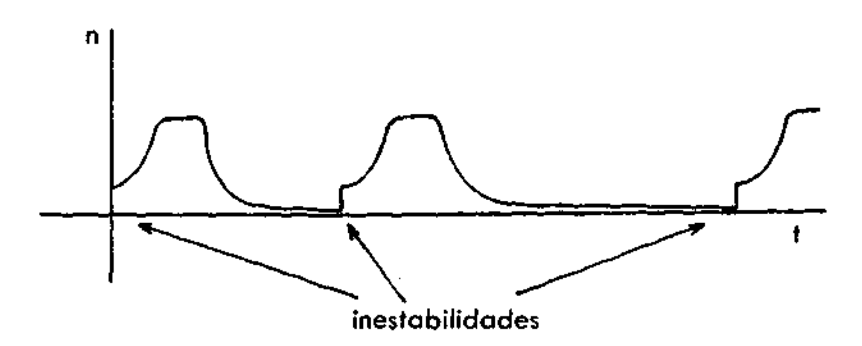


Figura 24.—*¿Eternidad de una sucesión de inestabilidades creadoras de Universos?*

materia puede restaurar el vacío inestable. De esta forma pudiera suceder que en un futuro lejano tuviera lugar una nueva inestabilidad creadora de Universo. En este caso podríamos conferir a la eternidad del Universo una nueva significación, la de una serie de explosiones entrópicas que se suceden en el tiempo (*fig.24*).

El Universo es una esfera cuyo centro está en todas partes v la periferia en ninguna *: ¿podría extenderse al tiempo está concepción tradicional del infinito? ¡Qué mejor símbolo del fin de la confusión entre irreversibilidad y degradación! Reencontraríamos aqui la flecha del tiempo asociada a la inestabilidad y a la probabilidad, y ella no significaría ya evolución hacia la muerte térmica, hacia el fin de toda historia, sino posibilidad de un eterno volver a comenzar. El Universo sería creación continua, sucesión infinita de Universos que nacen por doquier y van hacia el infinito.

Lo hemos dicho al principio de este capítulo: la cosmología es en lo sucesivo un laboratorio de experimentación conceptual. Es notable que de este laboratorio surja hoy una construcción intelectual que, lejos de oponer el mundo celeste y el mundo sublunar, el Universo eternamente idéntico a sí mismo y el mundo cambiante de los seres vivos, permite pensar su afinidad. Esta afinidad traduce el modo en que a partir de ahora podemos aproximar la proliferación de los tiempos múltiples asociados a la creación de nuevas formas de existencia.

No podemos pensar en un nacimiento absoluto del tiempo. Podemos hablar del tiempo de nuestro nacimiento, del tiempo de la fundación de Roma, o del tiempo de la aparición de los mamíferos, e incluso del tiempo del nacimiento del Universo. Pero la cuestión de saber «cuándo empezó el tiempo» escapa más que nunca a la física, como sin duda escapa también a las posibilidades de nuestro lenguaje y nuestra imaginación. No podemos pensar el origen del tiempo sino solamente las «explosiones entrópicas» que lo presuponen y que son creadoras de nuevas temporalidades, productoras de nuevas existencias caracterizadas por tiempos cualitativamente nuevos. El tiempo «absoluto» que precede a toda existencia y todo pensamiento nos sitúa así en ese enigmático lugar que reaparece una y otra vez en la tradición filosófica, entre el tiempo y la eternidad.

* Fue Nicolás de Cusa quien aplicó por primera vez al Universo esta concepción de Dios propia de la tradición pseudo hermética. (Véase el libro de Koyrá citado en el próximo capitulo.) [N. del T.]

Capítulo 8
ENTRE EL TIEMPO Y LA ETERNIDAD

«Del mundo cerrado al Universo infinito»[1]: así caracterizó Alexandre Koyré la agitación intelectual y cultural en la que se inscribe el nacimiento de la física moderna. La pérdida de la posición privilegiada de la Tierra, ahora convertida en un bólido insignificante en el seno de un espacio infinito, sanciona la destrucción de las verdades establecidas mediante las que el cosmos aristotélico relacionaba conocimiento intelectual, orden político e ideal ético. ¿Qué sabemos? ¿Sobre qué bases establecer la diferencia entre un orden social justo? Gracias a Umberto Eco millones de lectores han descubierto en qué medida estas preguntas, que todavía hoy nos hacemos, nos ligan a esta Edad Media que vio la disolución del antiguo orden cósmico.

Sin embargo, desde hace trescientos años. ¡qué contraste entre esta inquietud y las certezas de la física moderna, entre las incertidumbres de los hombres y de sus sociedades y la transparencia inteligible de las leyes que se consideran gobiernan el mundo físico!

La verdad es ajena al tiempo del devenir. Para llegar a contemplarla, el alma, prisionera del cuerpo, de los sentidos, de las apariencias, debe liberarse de las ataduras que la traban. El

[1] Collection Idees, París, Gallimard. 1973. Edición española: *Del mundo cerrado al Universo infinito*, Siglo XXI de España, Madrid, 1984.

hombre de ciencia debe dejar de interesarse por un mundo engañoso y cambiante a fin de alcanzar el conocimiento verdaderamente intelectual. Estos temas platónicos aparecen de nuevo de manera explícita en los textos de Einstein. Pero igualmente están inscritos en el corazón de la física, en la oposición tradicionalmente afirmada entre las leyes «fundamentales», que describirían la eternidad objetiva del mundo, y las descripciones «fenomenológicas», irreversibles y probabilistas, que serían relativas a los límites prácticos del conocimiento humano. Extraño destino éste: una ciencia que debía simbolizar la ruptura con los antiguos juicios de valor y de significado, la exploración abierta, experimental, del mundo de los fenómenos, reencuentra una forma de platonismo mucho más radical que la que había descubierto Koyré. Este «platonismo» no se limita a juzgar el mundo fenoménico según un ideal matemático, a oponer conocimiento intelectual y conocimiento sensible; él confiere a la mayor parte de las leyes de la física el rango inferior de conocimiento «sensible».

Hoy podemos comprender mejor las razones de esta situación. La descripción de Koyré dejaba en la sombra los límites intrínsecos que marcan la concepción clásica de un Universo infinito. El Universo clásico, aunque infinito por sus dimensiones espaciales, no es menos cerrado en el sentido en que el devenir y la novedad están excluidos de él, en el sentido en que en él toda evolución debe idealmente ser reducida al modelo de los movimientos periódicos. Pues éste es el modelo que lleva implícito la propia noción de trayectoria dinámica. Lo hemos visto en el capítulo 5: cualquier sistema dinámico integrable puede representarse en términos de movimientos independientes unos de otros.

La física clásica ha perpetuado así. en un mundo todavía más marcado por la inseguridad de la historia, el ideal de esta eternidad, de este movimiento inmutablemente repetitivo que, para los griegos, confería un carácter divino al mundo celeste.

¿Cómo no recordar las dudas del propio Platón cuando evocó. en *El Sofista*, la relación entre ser y devenir? El Extranjero resume con ironía el problema platónico que hoy volvemos a encontrar en el corazón de la física: «Y decís vosotros que es a través del cuerpo, y por medio de la percepción, como comunicamos con el devenir. mientras que a través del alma, y por medio

del razonamiento, accedemos a la realidad de la existencia, de una existencia que, seguís diciendo, presenta habitualmente las mismas relaciones mientras que el devenir se presenta, por su parte, tan pronto de una forma como de otra»[2]. En el momento de arrastrar a su interlocutor Teeteto al camino que les llevará a cometer el «parricidio», a violar la prohibición de Parménides y dar un sentido al «no-ser», el Extranjero concluirá que, «a imitación de los niños», debemos reconocer a la vez la realidad del ser inmóvil y la del devenir.

Querer, como los niños, a la vez el ser inmóvil, eternamente idéntico a sí mismo, y el devenir: ¿será quizá este desafio del Extranjero el que, ya desde los griegos, ha puesto en movimiento nuestro pensamiento, le ha llevado a las más sutiles especulaciones, a las más extrañas construcciones? Donde quiera que nos volvamos encontramos la misma tensión entre el ser y el devenir, entre la eternidad y el tiempo, ya sea en la problemática teológica del pecado y de la salvación, en la búsqueda cartesiana de las ideas claras y distintas, o en el rechazo, reiterado incesantemente desde Kant, de reducir el juicio ético a la simple traducción de los valores creados por la historia de los hombres.

¿No encontró esta misma tensión su expresión simbólica más dramática con Einstein? ¿Cuántos moralistas han meditado, a partir de 1945, este contraste simplista pero elocuente?: Einstein, el físico místico que afirmó que para él la única pregunta verdaderamente interesante era la de saber si Dios había tenido elección en el momento de crear el mundo, pero cuyas investigaciones serían responsables del giro irreversible que, con Hiroshima, tomó la historia humana... ¿Cómo integrar estos dos aspectos de la física, su objeto ajeno a toda historia y su papel histórico? Pero también, ¿cómo entender que una ciencia pueda llegar a negar, a la manera de un saber místico, la realidad de lo que se proponía comprender? Como escribió Karl Popper a propósito de la interpretación probabilista de la irreversibilidad: «Pienso que la idea de Boltzmann es vertiginosa por su belleza y su audacia. Pero también pienso que es complétamete insostenible, al menos para un realista. Hace del cambio unidireccional una ilusión y ello convierte la catástrofe de Hiroshima en una

[2] Platón, *Le Sophiste*, 248 a. Traduction de L. Robín (*OEuvres complètes*, Paris, Gallimard, Bibliothéque de la Pléiade. vol. 2).

ilusión. Así, nuestro mundo se hace ilusorio y, con él, *todas nuestras tentativas de aprender más sobre nuestro mundo»* [3].

Lo hemos subrayado en los primeros capítulos de este ensayo: sólo de manera anecdótica, aunque intrínseca, pertenece la física a esta tradición de pensamiento «platónico», tendida entre el tiempo y la eternidad. Algunos han podido tratar de reducir cualquier ciencia a una simple búsqueda de relaciones generales que permitan predecir y dominar los fenómenos. Pero nunca esta concepción «adulta» y desencantada de la racionalidad ha podido acallar la convicción en la que arraiga la pasión de los físicos: su investigación trata de *comprender* el mundo, de hacer inteligible el devenir de la Naturaleza y no simplemente de describir cómo se presenta «tan pronto de una forma como de otra». Sin embargo, también lo hemos subrayado, esta búsqueda de inteligibilidad no significa que la física esté condenada a quedar prisionera de la forma de platonismo que ya denunciaba el Extranjero, que esté condenada a la incoherencia radical que subrayaba Popper: construir un modo de inteligibilidad que haga ilusorias no sólo la vida humana, marcada por el tiempo y la historia, sino también los fenómenos a partir de los que construimos esta inteligibilidad.

En el momento de concluir este ensayo nos sentimos muy próximos a estos niños platónicos que quieren a la vez la inteligibilidad del ser y de la realidad sensible del devenir. Pero sabemos también que la articulación del ser y el devenir no es uno de esos problemas susceptibles de recibir una solución que se impone como verdadera de una vez por todas. Es una cuestión insistente que abre la investigación a nuevos problemas, que agudiza la exigencia y la imaginación del físico, que hace más inesperados los caminos que emprende. Lo que hemos descrito a lo largo de este libro no es «la» solución al fin encontrada al enigma platónico, capaz de reconciliar el ser eternamente idéntieo a sí mismo de Parménides y el devenir que, como recordaba el Extranjero mucho antes que Popper, sólo él permite dar sentido a la vida y a la inteligencia que aprende. Pero esto tampoco es un mito, como e¡ que narraba Platón cuando debía proponer una solución sin poder construir el camino que llevaba a su demostración. Por el contrario, es un camino que hemos descrito: la

[3] K. Popper. *Unended Quest*, *op. cit.*, p. 160.

invención de nuevas relaciones coherentes entre las leyes intemporales sobre las que se han basado hasta ahora algunos de los éxitos más notables de la física, y el mundo de los procesos y de los sucesos sin lo que nuestra vida y nuestra actividad práctica no tiene sentido.

Se subraya, a menudo de manera demasiado exclusiva, el poder innovador de las ciencias. Sin embargo, éstas no innovan sin recrear al mismo tiempo el sentido de su pasado, sin reinterpretar su tradición. De hecho, es la tradición de una ciencia la que basa su andadura, orienta sus preguntas, confiere su interés a sus elecciones y sus problemas. Pero esta tradición no constituye tanto un límite como una condición que provoca y fecunda el presente. Una obra científica no puede crear una ruptura que anule el camino que la ha hecho posible; ella mira a la vez hacia el pasado del que hereda y hacia el futuro que propone. Por ello, no se trata de «desertar» de la física de la eternidad sino de responder al desafio que supone su éxito.

¿Cómo entender la nueva coherencia que hoy se alumbra? Quizá podríamos invocar aquí una analogía con la revolución kepleriana. Los griegos tenían por evidente que sólo la perfección del círculo podía dar sentido a la de los movimientos celestes. Por ello juzgaron en función de este ideal los movimientos reales que observaban. A partir de entonces, desde Ptolomeo hasta Copérnico, la astronomía se consagró a «salvar los fenómenos», a construir de manera ad hoc las complejas trayectorias de círculos y epiciclos que permitirían hacer compatibles el ideal y la observación. Pero la física, desde Galileo hasta nuestros días, ha sido guiada también por un ideal de perfección, aquel que Leibniz bautizó con el nombre de «principio de razón suficiente». Como sucedía con el círculo griego, la igualdad reversible entre causa y efecto ha constituido una ligadura casi invisible, hilo conductor que lleva de la física galileana a la mecánica cuántica y a la relatividad, como el círculo lleva de Ptolomeo a Copérnico. Kepler renovó el ideal de inteligibilidad de la astronomía: osó «romper el círculo» y crear las matemáticas que permiten comprender los fenómenos que la astronomía tradicional se limitaba a salvar. Romper el círculo de la razón suficiente, crear un lenguaje matemático que haga inteligibles los procesos y los sucesos irreversibles que la física tradicional se limita a «salvar» con aproximaciones fenomenológicas; a este

desafio fue llevado finalmente uno de nosotros por su interés por la cuestión del tiempo.

A lo largo de este libro algunos temas han reaparecido como leitmotivs, especialmente los de inestabilidad y suceso. En efecto, estos dos temas constituyen el medio de escapar al círculo de la razón suficiente.

El ideal de la razón suficiente suponía la posibilidad de definir la «causa» y el «efecto» entre los que una ley de evolución establecería una equivalencia reversible. La inestabilidad, como hemos visto, hace ilegitimo este ideal. Pero también abre un nuevo campo de cuestiones en los que el suceso juega un papel central. En todos los dominios que hemos explorado hemos reencontrado, bajo formas diferentes, esta noción de suceso. Es el caso de la fluctuación que provoca una transformación cualitativa del régimen de funcionamiento de los sistemas lejos del equilibrio, de la aparición hipotética de macromoléculas capaces de participar en un nuevo tipo de historia que sería la de la vida, de la colisión creadora de correlaciones, de la transición espontánea que lleva a un átomo desde un estado excitado a su estado fundamental y, en fin, del propio nacimiento de nuestro Universo. En cada caso, el suceso crea una diferencia entre el pasado y el futuro que la razón suficiente definía como equivalentes. Es el producto inteligible de un pasado del que sin embargo no podía ser deducido. El abre un futuro histórico en el que se decidirá la insignificancia o el sentido de sus consecuencias. En torno a las nociones de inestabilidad y de suceso se alumbra así la posibilidad de superar la oposición entre el objeto sometido a las categorías de la razón suficiente y el sujeto que, por definición, debería escapar a ellas.

Muchos pensadores, como Bergson, han subrayado la necesidad de escapar de esta oposición. Pero la mayoría han pensado que ello requeriría otro tipo de ciencia, léase de conocimiento. Ahora bien, no es mediante una puesta en cuestión de la física sino en el mismo seno de la tradición físico-matemática, tradición de invención y no de reducción, como se ha renovado la cuestión del objeto físico.

El papel jugado hasta aquí por el principio de razón suficiente en el seno de la física está muy claro visto retrospectivamente. Este principio parecía garantizar la independencia del objeto con respecto a quien lo observa: la igualdad entre causa y efecto

significa que la definición no ha dejado escapar nada que pueda ser pertinente para el comportamiento del objeto y, por lo tanto, no debe nada a una elección arbitraria. Recíprocamente, es sobre la independencia del objeto respecto al sujeto donde muchos físicos, continuando a Einstein, han basado la noción de «realidad física». Una tal realidad se oponía evidentemente a la realidad de la experiencia vivida, en el sentido de Bergson y los fenomenóíogos. También se oponía a la realidad que atribuimos a los demás hombres, que no es función de su independencia respecto a nosotros sino de las relaciones que podemos mantener con ellos.

Volvemos aquí al mismo tema de la discusión entre Einstein y Tagore (cap. 2). ¿Estamos muy lejos de la postura de Einstein? La respuesta inmediata parece que debe ser afirmativa, en la medida en que este último ha identificado tan a menudo realidad y determinismo. Pero la exigencia de independencia respecto del observador tiene múltiples sentidos. El principio de razón suficiente implica que cualquier desviación del determinismo traduce una definición incompleta del objeto, es decir, una definición abierta a lo arbitrario. Si Einstein luchó contra cualquier forma de indeterminismo en física era porque él se situaba en esta tradición. Pero las nociones de inestabilidad y suceso no deben nada, como hemos visto, a lo arbitrario. Ellas no traducen la renuncia al principio de razón suficiente sino el descubrimiento de situaciones donde éste deja de ser legítimo, donde entra en conflicto con la propia idea de conocimiento cuyo ideal se supone que define.

En su introducción a la *Crítica de la razón pura,* Kant denunciaba la ilusión del idealismo platónico: del mismo modo que la paloma, al sentir la resistencia del aire que se opone a su vuelo, podría imaginar que volaría mejor en el vacío, Platón creyó, al abandonar el mundo sensible y los obstáculos que este mundo opone al entendimiento, que podía arriesgarse, en alas de las ideas, en el vacío del entendimiento puro. De modo en cierta medida similar, Wittgenstein denunció, en las *Investigaciones Filosóficas,* la ilusión sobre la que construyó su *Tractatus:* la de una relación unívoca entre la esencia lógica del lenguaje, y el orden *a priori* del mundo. El presupuesto según el cual el lenguaje responde a la pureza cristalina de la lógica nos sitúa sobre una superficie helada «donde no hay razonamiento y

donde las condiciones son así, en cierto sentido, ideales, pero también donde, precisamente por ello, somos incapaces de caminar. Queremos caminar: también necesitamos el *rozamiento*. ¡Volvamos al suelo rugoso!»[4]

¿Cuál es el alcance de nuestro conocimiento? ¿Qué ligaduras delimitan los campos de nuestras manipulaciones? El ideal de omnisciencia hacía de estas cuestiones, que abren la noción de objetividad a las preguntas de Tagore, la marca de nuestra imperfección. Ahora bien, son ellas las que nos permiten aprender, explorar los relieves intrínsecos de nuestro «mundo» cualitativamente diferenciado. La ligadura a la que está sujeta la dinámica con ruptura de simetría que hemos introducido en los capítulos 5 y 6 —el carácter finito de toda definición— nos lleva de nuevo al suelo «rugoso» sobre el que podemos caminar, es decir, observar y aprender, el suelo sobre el que podemos apoyarnos para construir una descripción que dé un sentido intrínseco a lo que aparecía como un obstáculo.

Los límites de validez del principio de razón suficiente que traducen sobre todo las nociones de inestabilidad y de suceso son objetivos en el sentido de Einstein: son independientes del observador y dependientes únicamente de las condiciones que definen *cualquier* observación. De este modo, el abandono del ideal determinista no significa despreciar ninguna información que, en principio, pueda llegar a ser accesible aunque sólo fuera en un experimento mental. En cambio, como ya hemos visto en el caso de la dinámica clásica, este ideal ha ocultado el problema intrínseco planteado por la inestabilidad dinámica. El lenguaje de la dinámica clásica, al remitir al físico a un saber que jamás podrá llegar a ser el suyo, ha creado la ilusión de una semejanza entre sistemas dinámicos que ahora, y en lo sucesivo, sabemos que son cualitativamente diferentes.

Quizá, en este sentido, nuestra posición no esté tan alejada de la de Einstein. Este temía sobre todo los peligros de una postura solipsista, de un conocimiento que no se ajusta a la realidad sino que la somete a las creencias, a los deseos, a las necesidades de los hombres. Hoy ha quedado claro que el ideal que le guiaba

[4] L. Wittgenstein, *Philosophical Investigations*, 107, Oxford, Blackwell, 1953. Edición bilingüe alemán-castellano a cargo de Carlos Ulises Moulines y Alfonso García Suárez: *Investigaciones Filosóficas*. U.N.A.M., México 1986 y Crítica, Barcelona, 1988.

constituía en sí mismo una creencia de este tipo, que disimula aspectos esenciales de la realidad que tratamos de comprender.

La exploración que hemos descrito a lo largo de este libro ha estado llena de sorpresas, jalonada por el descubrimiento de perspectivas inesperadas. Nos ha llevado a recorrer todos los dominios de la física en los que había dominado la negación de la flecha del tiempo. No podía ser de otro modo: en cada uno de los dominios a los que nos hemos aproximado, esta negación era inseparable de las categorías del objeto físico, de la estructura conceptual que da su sentido a la andadura del físico, a las cuestiones que plantea, a la interpretación que da de las repuestas que obtiene. En cada dominio era preciso, por ello, encontrar una falla, una dificultad oculta por la teoría, a partir de la que pudiera construirse una descripción más general que sitúe esta teoría como caso límite y permita comprender como relativa a esta situación límite la negación del tiempo que ella había podido operar.

Nuestra exploración comenzó con el mundo de los procesos físico-químicos, este mundo al que, según el juicio tradicional de los físicos, no corresponde ninguna categoría objetiva sino solamente un modo de descripción determinado por los límites de nuestros medios experimentales.

La termodinámica del equilibrio parecía corresponder, en efecto, a la imagen de una ciencia puramente práctica, determinada por nuestras necesidades de manipular y de prever. El estado de equilibrio se encontraba entonces naturalmente privilegiado en la medida en que corresponde al estado que p.uede quedar totalmente caracterizado por una descripción en términos de valores medios. Pero la ciencia de los procesos lejos del equilibrio se abre, por su parte, a las cuestiones de un mundo en devenir, de un mundo cuya inteligibilidad impone la concepción de nuevas relaciones de causalidad. La posibilidad de describir el estado de equilibrio como sujeto a nuestras manipulaciones, lejos de definirlo como representativo de los estados macroscópicos, remite ahora a su singularidad: es el único estado que se puede describir en términos de componentes microscópicos esencialmente independientes unos de otros. El objeto general de la física de los procesos disipativos es, en lo sucesivo, el comportamiento de poblaciones de partículas correlacionadas,

susceptibles de generar comportamientos colectivos coherentes, de conocer transformaciones cualitativas que dan un sentido a las nociones de probabilidad, de inestabilidad, de suceso.

Actualmente la termodinámica no es ya una ciencia utilitaria que «salva» los fenómenos de los que depende nuestra vida práctica. Ella ha alcanzado el rango de ciencia fundamental, donde se experimentan cuestiones nuevas dirigidas no ya a objetos pasivos y manipulables sino a una realidad susceptible de permitirnos comprender lo que la física tradicional juzgaba ilusorio: la emergencia de lo nuevo.

Lejos del equilibrio la actividad de un sistema puede hacerse sensible a algunos factores de su entorno tales como la fuerza gravitatoria, cuyo efecto en el equilibrio sería insignificante. Hay una gran distancia, ciertamente, entre tal enunciado y los que se refieren al modo en que los hombres crean el sentido del mundo en el que viven. No se trata, y no hemos cesado de subrayarlo, de anular esta distancia, de «aplicar» los conceptos de la física lejos del equilibrio a las ciencias de la vida de los hombres, sino de definir el germen de una nueva coherencia entre las ciencias. Los físicos saben ahora que su modo de descripción, la elección de lo que puede ser despreciado o debe ser tomado en cuenta en la definición de su objeto no viene dado de una vez por todas sino que puede depender de modo intrínseco del régimen de actividad de aquello que estudian. Ellos descubren igualmente el problema de cualquier ciencia del devenir, la posibilidad de que una evolución transforme el sentido, el papel, la pertinencia de las variables en términos de las cuales quisiéramos comprenderla.

Durante largo tiempo un ideal de objetividad nacido de las ciencias físicas ha dominado y dividido las ciencias. Una ciencia, para ser digna de ese título, debía «definir su objeto», determinar las variables en función de las que pudieran ser explicados, entiéndase previstos, los comportamientos observados. Hoy día está naciendo una nueva concepción de la «objetividad científica» que pone de manifiesto el carácter complementario, y no contradictorio, de las ciencias experimentales, que crean y manipulan sus objetos, y las ciencias narrativas, cuyo problema son las historias que se construyen creando su propio sentido.

A partir de ahora se multiplican nuevos tipos de «transferencia de conocimiento». Así, como hemos visto, el estudio de los «atractores» que caracterizan a los sistemas disipativos propor-

ciona a las otras ciencias instrumentos conceptuales que, lejos de reducirlas a las categorías de la físico-química, suscitan en sus campos nuevas distinciones y problemas inesperados. Con la noción de atractor caótico, por ejemplo, ya no se trata de oponer determinismo e impredecibilidad, sino de intentar comprender *por qué* una evolución es impredecible, o por qué, como decía Platón, se presenta «tan pronto de una forma como de otra».

¿Podremos ir más lejos? ¿Podremos comprender algún día los devenires que traducen y ratifican las distinciones entre diferentes ciencias? Desde luego, la cuestión del origen de la vida se impone a este respecto como el mayor desafio. ¿Cómo concebir una historia susceptible de transformar sistemas físico-químicos en seres vivos? Este desafio suscita hoy problemas inversos a los de una reducción de lo biológico a lo físico-químico y conduce a una verdadera metamorfosis de la química.

Entre todas las formas de actividad disipativa, la actividad química tiene efectivamente el privilegio de inscribirse en la materia, crear moléculas susceptibles de convertirse ellas mismas en actrices de nuevos tipos de historia. ¿Cómo concebir las condiciones de producción de las moléculas «interesantes», a la vez diversas y reproducibles para que pueda construirse una historia a partir de ellas: ésta es la pregunta que hemos planteado. Cómo imaginar las ligaduras, las «reglas del juego» que suscitarían una historia de la que tales moléculas serían a la vez las actrices y los productos: éste es el objeto de las investigaciones de Manfred Eigen y de su equipo [5]. El origen de la vida sigue siendo un misterio pero está claro, en adelante, que la articulación entre la físico-química y la biología no pasará por una «fiscalización» de la vida sino por una «historización» de la físico-química, por el descubrimiento de las posibilidades de historia físico-química de la materia.

He aquí, para nosotros, el ejemplo tipo de la nueva coherencia entre las ciencias que creemos posible en lo sucesivo, coherencia fundada no sobre una definición unitaria de la «objetividad científica» sino sobre un problema común, el de el devenir, al que remiten tanto la pertinencia de nuestras preguntas como sus límites, tanto la validez de nuestras representacio-

Véase en particular J.S. McCaskill, *Biol. Cybern.*, vol. 56, 1984, p. 63.

nes como la necesidad, en ciertas circunstancias, de transformarlas de manera cualitativa.

Quizá estemos aquí próximos a lo que fue la base de la idea de «dialéctica de la Naturaleza», aún permaneciendo tan lejos como sea posible de la visión dogmática que suscitó. Ninguna «ley dialéctica» puede regular de manera estable las relaciones entre las ciencias, ni darnos una interpretación —o una visión— general del devenir. Toda ley tiene efectivamente como vocación autorizar la economía de riesgos de la narración: permite determinar a priori las cuetiones pertinentes, separar lo que ella define como inteligible de lo que sólo son circunstancias anecdóticas. La coherencia que describimos es de tipo dialéctico puesto que confronta cada interrogante, cada modo de inteligibilidad, cada instrumento de conocimiento con la cuestión de sus propias condiciones de pertinencia. Pero ella no autoriza ningún paso que llevara de la multiplicidad de estas cuestiones locales a una visión global. Ella no tiene como objetivo una «ciencia» unificada del devenir sino una apertura de las ciencias al problema del devenir,

¿Comprender los fenómenos y no «salvarlos», es decir, someterlos a una norma que garantizaría su cientificidad? Puede parecer extraño que el desarrollo de la física inspire hoy conclusiones similares a las de un Diderot, por ejemplo, mientras que la física de ayer había llevado a Kant a conclusiones opuestas: el científico no debe «aprender» de la Naturaleza sino dirigirse a ella como un juez que sabe a priori cómo debe responder a qué principios está sujeta. Actualmente la física no es ya ciencia de un Universo infinito pero cerrado en cuanto a sus comportamientos y sus posibles modos de conocimiento; ella no es ya extraña a las dudas, a la inquietud de un Guillermo de Baskerville descifrando ambiguos indicios, haciendo conjeturas que inventan el sentido de una historia y guían la investigación. Pero, ¿cómo reconciliar a Diderot y a Kant, a Guillermo de Baskerville y a Einstein, a la física de los procesos disipativos y las teorías fundamentales de la física que definen la irreversibilidad y la flecha del tiempo como ilusiones?

Esta exigencia ha sido un leitmotiv de nuestro libro: el tiempo irreversible debe poder describirse en todos los niveles de la física o no podrá ser comprendido en ninguno. La herencia de la física, el descubrimiento de la notable fecundidad de la «física

de la eternidad», la precisión extraordinaria de su concordancia con los datos experimentales nos obligan, como a los niños de Platón; a articular el tiempo y la eternidad. No podemos afirmar una física del devenir sin al mismo tiempo «comprender» la eternidad, comprender ia permanencia de las teorías fundamentales que niegan la flecha del tiempo. Pero es absurdo pensar que de una realidad descrita por leyes intemporales «nazca» el tiempo irreversible.

Por esta razón, los tres últimos capítulos de nuestro libro han estado dedicados a una «reivindicación» del sentido de la tradición física. No se trataba, como en el caso de la termodinámica, de descubrir el modo de inteligibilidad que exigía un dominio todavía poco explorado, el de ¡os procesos lejos del equilibrio, sino de poner en cuestión un edificio teórico cuya estabilidad y fecundidad simbolizan a los ojos de todo el mundo el triunfo de la física. ¿Cómo pensar que estructuras conceptuales —la relatividad y la mecánica cuántica— que desde su creación han sido tan notablemente confirmadas, hasta en sus implicaciones más insospechadas, por la experiencia hayan podido ignorar la flecha del tiempo si ésta marcaba sus objetos? ¿Cómo no ver en el triunfo de estas ciencias, que han asimilado inteligibilidad y descubrimiento de la «eternidad» más allá del cambio, la condena de la '.• reversibilidad a un rango meramente fenomenológico?

En cada caso hemos tratado de identificar una falla, un límite intrínseco del modo de conceptualización clásico, límite a partir del cual se ha mostrado posible a la vez comprender su éxito y transformar su sentido. En cada caso hemos visto aparecer esta flecha del tiempo que nuestra convicción nos llevaba a buscar allí mismo donde parecía haber sido victoriosamente negada. ¿Cómo no experimentar y reconocer, en el momento de concluir este libro, un sentimiento de admiración? ¿Cómo no ver retrospectivamente también, en la manera en que las estructuras conceptuales fundamentales de la física han podido ignorar esta flecha del tiempo que descubrimos hoy en todos los niveles, el testimonio de la creatividad humana, del poder del pensamiento simbólico que crea un mundo a ¡a vez «empobrecido, simplificado, pero también intensificado, magnificado?» [6]

* I. Prigogine, «Symboles en Physique», en *Cahiers internationaux du symbolisme*, n.° 3, 1962, p. 2.

En cada uno de los tres capítulos que nos han llevado al redescubrimiento de la flecha del tiempo nuestra andadura ha sido diferente como diferentes son las teorías de las que trataban estos capítulos. En el caso de la dinámica clásica el problema consistía en una reinterpretación de la teoría: desde Poincaré se sabía que la mayoría de lo sistemas dinámicos no son sistemas estables, «integrables». Hoy sabemos que, en general, la evolución de estos sistemas no puede describirse en términos de trayectorias deterministas y reversibles. Curiosamente, el formalismo actual de la mecánica cuántica es *solidario* del ideal de la dinámica clásica. La mecánica cuántica debe sufrir entonces una modificación radical para que la flecha del tiempo pueda ser definida en el nivel cuántico. Finalmente, en el nivel cosmológico, la cuestión del tiempo ha nacido de un problema que no podían tratar los modelos cosmológicos habituales: el de la creación de la materia que puebla nuestro Universo actual cuya relación con la estructura geométrica del espacio-tiempo describen las ecuaciones de Einstein.

La dinámica clásica sólo planteaba, como hemos dicho, un problema de reinterpretación. Sin embargo, este problema nos ha llevado a las raices de la física moderna, al ideal de omnisciencia que permite al físico comparar su conocimiento con el del Dios creador. Es este mismo ideal el que resurgió de manera explícita a finales del siglo XIX, con las controversias que suscitó la interpretación cinética de la entropía propuesta por Boltzmann. Si, en lugar de ser solamente observadores y manipuladores imperfectos, tuviéramos el poder de «ver» una población de partículas del mismo modo que la astronomía ve el sistema planetario, y de conferir a esta población un estado inicial de nuestra elección del mismo modo que somos capaces de hacerlo para un péndulo o un cohete, la irreversibilidad y las probabilidades perderían su sentido. Podríamos calcular el momento en el que una evolución aparentemente irreversible reconducirá al sistema a su estado inicial y crear evoluciones que alejan un sistema del equilibrio.

El desarrollo de las técnicas de simulación numérica permite hoy experimentar este poder que, en el siglo XIX, remitía solamente a los experimentos mentales. Pero estas técnicas, en lugar de reducir la desviación que nos separa del ideal de omnisciencia manifiestan por el contrario su carácter infranqueable. Este es el

sentido de la noción de «horizonte temporal», que era el núcleo de nuestro quinto capítulo. Todo conocimiento finito, ya remita a un ordenador *capaz* de calcular con un número de cifras decimales tan grande como queramos, o a los observadores humanos, choca en el caso de los sistemas dinámicos caóticos con el mismo limite: tras un tiempo de evolución que depende de la dinámica intrínseca del sistema, la noción de trayectoria individual pierde su sentido; sólo subsiste el cálculo estadístico de las probabilidades de evolución.

Irreversibilidad y probabilidades no son pues relativas a los límites de nuestro conocimiento sino que reflejan la existencia, para un sistema dinámico caótico, de un horizonte temporal que ¡imita la pertinencia de cualquier información presente en relación al futuro. Así es como hemos podido comprender por qué Boltzmann tenía razón al hacer de la teoría cinética el puente entre dinámica y termodinámica, la vía de acceso que lleva del mundo de las trayectorias al de los procesos físico-químicos.

Desde el punto de vista del ideal dinámico tradicional, el «suceso» que constituye la colisión, que está en la base de la teoría cinética, no plantea ningún problema particular. La modificación del estado del sistema que supone una colisión es reversible con el mismo título que cualquier evolución dinámica: basta, «en derecho», como lo había subrayado Loschmidt, invertir las velocidades para que el efecto aparentemente irreversible de las colisiones quede anulado por las colisiones inversas. Pero las simulaciones numéricas, que nos permiten «realizar» el sueño de una inversión simultánea de velocidades, nos muestran que este derecho es ilusorio. Cuanto más se alarga el tiempo de la evolución que precede a la inversión de velocidades menos efecto tendrá ésta. Para tiempos largos la flecha del tiempo domina la evolución del sistema.

Para construir un sentido intrínseco a la diferencia cualitativa entre los dos tipos de evolución que, «en derecho», aparecían como estrictamente equivalentes —la evolución que aleja del equilibrio y la que lleva a él—, es necesario romper la simetría temporal que el ideal de omnisciencia confiere a la colisión. Las colisiones que hacen evolucionar el sistema hacia el estado de equilibrio y las que lo alejan de él son cualitativamente diferentes: las primeras crean correlaciones entre partículas independientes; las segundas se producen entre partículas «pre-correla-

donadas» y destruyen las correlaciones entre estas partículas. Entonces, la dominación de la flecha del tiempo encuentra su sentido en la dinámica de las correlaciones creadas por las colisiones. La imposibilidad efectiva de invertir, tras un tiempo largo, la evolución del sistema refleja el *flujo de correlaciones* que, en el transcurso del tiempo de evolución, se pierden en un «mar» de correlaciones infinitamente múltiples e incoherentes.

Pero la dinámica de las correlaciones no se limita a dar una formulación exacta de la descripción cinética de la evolución hacia el equilibrio. Ella es también portadora de una nueva concepción del propio equilibrio. En la perspectiva tradicional, la descripción del estado de equilibrio era ajena a cualquier distinción entre pasado y futuro. Esta distinción parecía así meramente relativa a una situación macroscópica de no-equilibrio. Ahora bien, el flujo irreversible de las correlaciones caracteriza tanto el estado de equilibrio como los estados alejados del equilibrio. Incluso en el equilibrio las colisiones crean de hecho correlaciones que desaparecen sin producir efectos macroscópicos. Podemos entonces invertir la perspectiva tradicional: no es la desviación (macroscópica) respecto al equilibrio la responsable de la flecha del tiempo sino que es el estado macroscópico de equilibrio el responsable de que esta flecha del tiempo, siempre presente en el nivel microscópico, no tenga, en este estado, efecto macroscópico.

La colisión, transferencia de cantidad de movimiento y energía cinética entre dos partículas, constituye, desde el punto de vista dinámico, un ejemplo de *resonancia.* Ahora bien, desde Poincaré se sabe que la existencia de puntos de resonancia impide definir la mayoría de los sistemas dinámicos como integrables. La teoría cinética, que corresponde al caso de un gran sistema dinámico que tiene puntos de resonancia «casi por doquier» en el espacio de fases, marca así la transformación de la noción de resonancia: ésta deja de ser un obstáculo para la descripción en términos de trayectorias deterministas y reversibles para convertirse en un nuevo principio de descripción, intrínsecamente irreversible y probabilista.

Esta misma noción de resonancia es la que hemos reencontrado en el corazón de la mecánica cuántica, puesto que es la que utilizó Dirac para explicar los sucesos que abren un acceso experimental al átomo, la emisión y la absorción de fotones de

energía específica, cuyo espectro constituye la verdadera firma de cada tipo de átomo.

La mecánica cuántica ha fascinado a los físicos, los filósofos y los historiadores. La mayoría han leído en su historia la pérdida —parecía que definitiva— del ideal de una descripción física realista que se dirigía a un mundo independiente de la observación. Nosotros hemos leído en ella el triunfo paradójico del ideal con el que se identificaba tradicionalmente el realismo físico, el ideal determinista del que era portadora la trayectoria dinámica.

Por esta razón hemos puesto el acento sobre el contraste entre la primera teoría, cuántica, debida a Bohr, Sommerfeld y Einstein, y la mecánica cuántica actual. La primera hacía coexistir una descripción «mecánica» del átomo y una descripción esencialmente probabilista de los «saltos» entre órbitas electrónicas acompañados de la emisión o absorción de un fotón. La segunda ha dado una descripción puramente mecánica del átomo, directamente calcada del modelo de los sistemas integrables. En esta perspectiva interpretó Dirac las transiciones electrónicas, espontáneas y estimuladas, en términos de resonancia entre átomo y campo electromagnético.

La mecánica cuántica actual constituye sin duda el mejor símbolo de una física desgarrada entre el tiempo y la eternidad. Para comprender cómo el mundo transparente de las trayectorias dinámicas hace ininteligible la posibilidad de su observación necesitamos liberarnos de la representación ideal del astrónomo que observa un mundo indiferente a sus medidas, y recordar que toda medida supone la irreversibilidad de una marca. Pero el mundo cuántico sólo nos es accesible por los sucesos que le afectan, por su devenir intrínsecamente probabilista e irreversible. Ahora bien, si bien el formalismo actual permite predicciones en notable acuerdo con la experiencia, no puede dar un sentido exacto al suceso probabilista que constituyen, por ejemplo, las transiciones electrónicas que nos dan acceso al tomo. La vida media, que sin embargo caracteriza de manera intrínseca a un nivel excitado, depende en este formalismo de una aproximación y pierde su sentido si el cálculo se lleva más lejos. Por ello, la mecánica cuántica ha tenido que reconocer el suceso sin poder, como heredera de la física de la eternidad, darle sentido objetivo. Por esta razón pudo parecer que ponía en cuestión la

misma realidad del mundo observable que ella debía hacer inteligible.

La mecánica cuántica constituye así, por su singular estructura, la ilustración de la tesis del Extranjero de Platón: sin el devenir el ser no sería cognoscible. La irreversibilidad es la condición misma del conocimiento, y la evolución reversible y determinista de la función de onda, que está en el centro del formalismo cuántico actual, no puede entonces describir la evolución de un ente observable. La función de onda sólo puede tomar un sentido físico mediante su «reducción» irreversible que permite definir las probabilidades de las diferentes magnitudes observables que somos susceptibles de medir.

La estructura dualista, tan controvertida, de la mecánica cuántica no pone en cuestión, en nuestra perspectiva, la «realidad» del mundo cuántico. Ella muestra el carácter secretamente contradictorio del ideal clásico: ideal de un mundo puramente inteligible pero que hace ininteligible el hecho de que podamos reconocerlo y observarlo. Si una descripción realista del mundo cuántico debe ser posible no será tratando de restaurar este ideal, sino dando a la irreversibilidad y a las probabilidades cuánticas un sentido independiente de la observación.

Sin embargo, la fecundidad del modelo de los sistemas integrables en mecánica cuántica expresa la especificidad del mundo cuántico con respecto al que describe la mecánica clásica. La posibilidad de describir los comportamientos cuánticos mediante una función de onda traduce su coherencia singular, que se manifiesta por otra parte, en el nivel macroscópico, en propiedades como la superconductividad. ¿Cómo integrar la flecha del tiempo en un formalismo que define todo sistema cuántico finito como cuasi periódico, que afirma así de manera explícita la equivalencia entre pasado y futuro?

Pero, ¿qué es un sistema cuántico finito? Para explicar las transiciones electrónicas espontáneas que confieren a todo estado excitado una vida media finita, Dirac tuvo que hacer la hipótesis de un campo inducido por el átomo y entrando en resonancia con él. El sistema finito que representa el átomo aislado no es entonces más que una abstracción. El átomo en interacción con su campo es, en sí mismo, un «sistema cuántico grande» y a su nivel es como se reproduce la «catástrofe de Poincaré».

El átomo en interacción con el campo que él mismo induce no constituye de hecho un sistema integrable y no puede ya ser representado por la evolución de una función de onda de la misma forma que un sistema clásico caracterizado por puntos de resonancia no puede ser caracterizado por una trayectoria. Aquí está la falla que escondía el impresionante edificio de la mecánica cuántica. A partir de ella se hace posible una modificación de esta teoría, el abandono de la noción de función de onda en favor de una descripción con ruptura de simetría temporal que da un sentido intrínseco a la vida media, es decir, al suceso cuántico. Algunas consecuencias observables de tal modificación deberían poder ser confirmadas o refutadas experimentalmente en un futuro próximo. Si fueran confirmadas podríamos afirmar que la flecha del tiempo, lejos de ser una propiedad fenomenológica que caracteriza un sistema macroscópico —como, por ejemplo, un aparato de medida— marca ya el más sencillo de los objetos cuánticos, el átomo de hidrógeno.

La nueva teoría cuántica que hemos esbozado aquí es una teoría realista. Ella da un sentido independiente de la observación a los sucesos que nos permiten caracterizar el mundo cuántico. Igualmente, ella redefine la significación de la eternidad inobservable de la función de onda y de la estructura dualista de la mecánica cuántica actual: la función de onda, heredera de la dinámica de los sistemas integrables, permanece válida en el caso en que el suceso condición de la medida es provocado por la interacción con un dispositivo experimental; pero en el caso en que el objeto de observación es en sí mismo un suceso es preciso abandonar la función de onda y, por consiguiente, también la necesidad de su reducción. Podemos atribuir al propio átomo la vida media que caracteriza a sus niveles excitados.

¿Quién crea el suceso? ¿Quién tiene la iniciativa? ¿Nosotros mismos, con nuestros dispositivos experimentales, o el ente al que interrogamos? Esta distinción debía quedar oculta por una teoría que no podía dar sentido al suceso probabilista *e* irreversible, de la misma forma que había sido ocultada la distinción entre probabilidades que provienen de nuestra ignorancia de hecho y las que se imponen de manera intrínseca para caracterizar un comportamiento caótico. Ella refleja la coherencia reencontrada entre la teoría cuántica que hemos propuesto —y que hace de la irreversibilidad la condición misma de cualquier

conocimiento— y el tipo de acceso experimental que, desde el comienzo de este siglo, ha abierto el mundo cuántico.

De la termodinámica a la mecánica cuántica, la situación ha conocido así una completa transformación. La irreversibilidad no es ya lo que debe ser explicado, ya sea por las condicines macroscópicas de no-equilibrio o por el acto de observación. Por el contrario, es la singularidad de las situaciones a las que corresponden las leyes reversibles la que se ha puesto de manifiesto. Queda sin embargo el dominio en donde, desde comienzos de este siglo, el tiempo evolutivo hizo una irrupción inesperada: la cosmología.

La historia de los modelos cosmológicos comenzó de hecho con el fracaso del ideal determinista allí donde parecía que debía tener su triunfo más sonoro: en la concepción de Einstein de un Universo estático, eternamente idéntico a si mismo. Sin embargo, ya lo hemos señalado, el Universo en expansión del modelo «standard» hoy dominante no es un Universo en devenir. Hubiera podido también, desde el punto de vista de las ecuaciones de la relatividad general, estar en contracción y, como sabemos, uno de los escenarios cosmológicos posibles, según estas ecuaciones, es un eterno retorno de fases sucesivas de expansión y contracción.

El límite intrínseco del modelo standard ha sido considerado siempre por los físicos como un problema mayor. En efecto, la eternidad estática no ha sido substituida simplemente por un Universo en evolución eterna. sino por un Universo que plantea el problema de su singularidad original, la singularidad asociada al Big Bang, como desdeñosamente la bautizó Fred Hoyle. Si «remontamos» la evolución del Universo tal como la describe el modelo standard debemos llegar a un estado físicamente inconcebible en el que toda la materia y la energía estarían concentradas en un punto.

Desde hace veinte años, el descubrimiento de la radiación fósil, testimonio que nos ha llegado de manera casi imperceptible del «fin» del Big Bang, del desacoplamiento de la luz con la materia, ha transformado la cosmología einsteniana en una verdadera cosmogénesis: la expansión del Universo durante sus «primeros» trescientos mil años va a la par con la historia de la transición de los objetos de la física de altas energías a los de la mecánica cuántica usual: átomos en interacción con un campo

electromagnético. No obstante, la singularidad misma sigue siendo impenetrable y, con ella, el Universo «a la escala de Planck» cuyo tiempo característico es de 10^{-44} segundos.

La singularidad inicial asociada al Big Bang es la consecuencia directa del carácter estático de la cosmología einsteniana, de la simetría de las relaciones que establece entre el espacio-tiempo y la materia. En la perspectiva que hemos propuesto, esta simetría, heredera de la teoría newtoniana de las masas en interacción gravitatoria, se rompe. La materia se distingue del espacio-tiempo en cuanto que ella es portadora de la entropía del Universo. Su existencia no es ya un dato, como lo presupone el modelo standard, sino que es el producto de un proceso irreversible de creación. La singularidad inicial se sustituye entonces por la inestabilidad de un Universo primordial vacío, en el que el espacio-tiempo se curvaría radiando materia de la misma forma que un átomo excitado vuelve a su estado fundamental radiando luz.

También aquí la significación de la irreversibilidad sufre una mutación radical. De apariencia ligada a un conocimiento imperfecto la hemos visto convertise en condición misma de todo conocimiento. La vemos ahora asociada no ya a la muerte térmica del Universo sino a su nacimiento; no ya a una evolución que lleva sin retorno hacia un estado inerte sino quizá a una sucesión eterna de Universos. ¿Cómo no sorprenderse de este curioso retorno a una antigua concepción de la eternidad? Pero, ¿no estaba esta concepción alimentada por el saber del retorno de las estaciones, del retorno de las generaciones, por los ritmos de una Naturaleza tejida de procesos intrínsecamente irreversibles y sin embargo incesantemente renacientes?

El eterno retorno que la cosmología permite hoy no ya afirmar sino concebir, no es un retorno de la física hacia los mitos. Simboliza más bien el hecho de que la irreversibilidad está en adelante despojada de las connotaciones negativas que constituían la herencia de la física del siglo XIX, en cuyo seno el segundo principio de la termodinámica se limitaba a anunciar la impotencia humana para someter los procesos físico-químicos al principio de razón suficiente. En un principio, la distinción entre el antes y el después se impuso en la física como un defecto una desviación del ideal. Con la concepción cosmológica de Boltzmann esta desviación se identificó con la propia existencia del

Universo: prueba por reducción al absurdo de que ni nuestro conocimiento ni nuestra existencia sería concebible sin la irreversibilidad, en un mundo regido por la sola razón suficiente. Hoy, la irreversibilidad ya no significa desviación del ideal sino el devenir en tanto que él supone la flecha del tiempo, en tanto que no puede ser comprendido a partir de la igualdad reversible de causa y efecto, pero en cambio permite comprender como singulares las situaciones en las que el ideal de esta igualdad pudo dar a la física sus primeros objetos.

La cuestión de saber «por qué hay algo y no nada» ha sido llamada la cuestión filosófica por excelencia. Podríamos decir que la física ha encontrado hoy los medios de responder a ella. Sin embargo, la cuestión, en el sentido filosófico, se encuentra de hecho desplazada. Podría formularse: «¿Por qué existe una flecha del tiempo?» Pues, al final de este recorrido donde se han roto sucesivamente tantos ideales de eternidad, donde el devenir irreversible ha sustituido en todos los niveles a la permanencia, la flecha del tiempo se impone como nuevo pensamiento de la eternidad. Ella, que había sido juzgada como relativa solamente al carácter aproximado de nuestro conocimiento, es la que en adelante reencontramos como condición, en sí misma incondicionada, de todos los objetos de la física, desde el átomo de hidrógeno al propio Universo. Ella es la que nos permite pensar la solidaridad entre los tiempos múltiples que componen nuestro Universo, entre los procesos que comparten el mismo futuro, e incluso quizá entre estos mismos Universos cuya sucesión indefinida podemos pensar hoy.

La física, habíamos dicho, descubre hoy una nueva coherencia. Quizá no haya mejor símbolo de esta coherencia que el hecho de que ella reencuentra, en las mismas raíces del Universo que de manera inesperada ha podido tomar como objeto, la diferencia intrínseca entre el pasado y el futuro sin la que no podemos ni pensar, ni hablar, ni actuar.

La oposición entre tiempo y eternidad que desde el comienzo hacia de la física la heredera de la oposición platónica entre lo real inteligible, objeto del conocimiento intelectual, y las apariencias cambiantes, que interesan al conocimiento sensible, ha perdido hoy su carácter estático y jerárquico. Ella se ha transformado en tensión inventiva que sitúa la física de hoy respecto a una herencia que la define y que ella redefine a su vez.

Desde este punto de vista es significativo que por todas partes hayamos reencontrado la noción de «ruptura de simetría». Esta noción implica una referencia aparentemente insuperable a la simetría afirmada por las leyes fundamentales que constituyen la herencia de la física. Y, en efecto, en un primer momento estas son la leyes que han guiado nuestra investigación. A ellas les hemos pedido el definir sus propios límites. Pero, en un segundo momento, la descripción con simetría temporal rota permite comprender la propia simetría como relativa a la particularidad de los objetos en otro tiempo privilegiados por la física, es decir, situar su particularidad en el seno de una teoría más general. La ruptura de simetría permite así una «génesis conceptual» de la flecha del tiempo a partir de las leyes físicas reversibles. La ruptura de simetría por la cual toma sentido la flecha del tiempo remite, como la «ruptura del círculo» kepleriana, no a la «Naturaleza» sino a la tradición de la física.

¿Qué es el tiempo? Aristóteles lo había definido como el número del movimiento en la perspectiva del antes y el después. Esta definición operacional separaba el tiempo del devenir, ponía frente a frente al «alma» que cuenta, que establece relaciones, y el movimiento periódico de los astros, expresión fiel de la inmovilidad del primer motor, patrón común que permite la medida de los diferentes movimientos. Podía suscitar así la cuestión de saber quién determina la perspectiva del antes y el después. ¿Es ésta relativa al alma que cuenta o bien está inscrita en el movimiento eterno a partir del cual es posible la cuenta? Esta cuestión, dramáticamente amplificada por la confesión de San Agustín —no puedo poner en palabras el saber que, sin embargo, creía tener del tiempo— ha sido a la vez ocultada y resuelta por la física moderna: ocultada, puesto que los movimientos dinámicos no son ya medidos de manera extrínseca por un tiempo-número que los relaciona con la regularidad de un movimiento periódico sino definidos por una ley intrínsecamente temporal; resuelta, puesto que esta ley no permite definir de manera «objetiva» la diferencia entre el antes y el después. Como hemos visto, la mecánica cuántica se ha visto confrontada de manera explícita con esta misma cuestión. Las dificultades de interpretación de su formalismo han sido suscitadas por el hecho de que, de seguirlo, sería el «alma» la que, para contar, es decir

también para observar, introduciría la perspectiva del antes y el después que supone y crearía el acto de observación.

No sabemos mejor que San Agustín lo que «es» el tiempo pero en lo sucesivo podemos relacionar las leyes del movimiento con la definición integral de Aristóteles. La medida intrínseca del movimiento impone la perspectiva del antes y el después. El movimiento «inventado» por Galileo y sus sucesores articulaba el instante y la eternidad. En cada instante el sistema dinámico estaba definido por un estado que contenía la verdad de su pasado y de su futuro. El movimiento tal como hoy lo concebimos da un espesor al instante y lo articula en el devenir. Cada «estado» instantáneo es memoria de un pasado que sólo permite definir un futuro limitado, acotado por un horizonte temporal intrínseco. La definición del estado instantáneo rompe así la simetría entre pasado y futuro y las leyes de su evolución propagan esta ruptura de simetría. Para expresar la solidaridad que nos une con el tiempo de las cosas, Bergson había escrito: «Debemos esperar que el azúcar se disuelva.» Esta solidaridad entre nuestro tiempo y el de los fenómenos es la que traducen implicitamente las leyes probabilistas, las cuales nos permiten predecir pero no reconstruir el pasado. Es ella la que afirma explícitamente la dinámica de los sistemas caóticos.

La imagen tradicional de las ciencias ha estado —lo subrayábamos en *La nueva alianza*— disociada entre dos polos aparentemente contradictorios: búsqueda de una realidad «objetiva», más allá de los fenómenos que «afectan» a los hombres, y empresa de dominación, de sometimiento al cálculo y a la previsión. Por encima de su contradicción estas dos imágenes de la racionalidad científica convergen hacia una conclusión única: es fatal que esta racionalidad separe a los hombres del mundo en el que viven, que este mundo sea declarado ilusorio o que sólo «cuente» en la medida en que puede ser medido y manipulado. En esta perspectiva sólo la libertad humana puede poner límites a las empresas de la razón: libertad trascendental del sujeto kantiano, que da sentido al «deber» allí donde las ciencias sólo pueden describir al hombre como sometido al encadenamiento de causas y efectos; libertad de las sociedades humanas que deben escoger sus fines allí donde las ciencias sólo pueden definir los medios.

Esta oposición entre conocimiento racional y libertad —o voluntad— humana es mucho más antigua que nuestras ciencias. Ella aparece ya en las especulaciones teológicas sobre las correlaciones entre la sabiduría del Dios creador y su libertad todopoderosa, y ella nos sitúa próximo al delirio, del saber racional que supone: debido a que a este saber se le reconoce en derecho el poder de ponernos frente a un mundo transparente a nuestra inteligencia, como lo es el ser a la mirada de Dios, es necesario que el hombre sea *absolutamente* libre para no ser *íntegramente* reducido a un fenómeno más. Debido a que se considera que las ciencias y las técnicas ponen indiferentemente a nuestro alcance futuros posibles que ella permitirían crear y prever, es necesario que la sociedad humana *decida*, en nombre de sus valores, lo que será su futuro.

Asi pues, las ciencias no pueden separarse de la aventura humana. Ellas no reflejan la identidad estática de una razón a la que habría que someterse o resistir, sino que participan de la creación de sentido con el mismo título que el conjunto de las prácticas humanas Ellas no pueden decirnos lo que «es» el hombre, la Naturaleza o la sociedad de tal suerte que a partir de ese saber podamos decidir nuestra historia. Ellas exploran una realidad compleja que asocia de manera inextricable lo que oponemos sobre los registros del «ser» y del «deber ser». ¿Qué puede la Naturaleza? ¿Qué puede el ser vivo? ¿Qué pueden los hombres? Estas preguntas son las que perviven en nuestras elecciones y nuestros rechazos. Son también las de las ciencias del devenir.

La búsqueda de una coherencia entre nuestros saberes ha sido un hilo conductor de este ensayo. Esta coherencia ya no puede tener el carácter estático que garantizaba el cosmos aristotélico, no puede determinar a priori y de una vez por todas los límites entre lo pensable y lo impensable. Las ciencias, como las técnicas, no cesan de desplazar estos límites, de suscitar posibles que conmueven tanto el orden del pensamiento como el de la sociedad. Estamos comprometidos irreversiblemente en una historia abierta en donde se experimenta lo que pueden los hombres y sus sociedades. No podemos tratar de descubrir esta coherencia a modo de una verdad que preexistiría a nuestra historia, ya ésta conduzca a ella o la haya olvidado. Sólo podemos construirla en el seno de esta historia, a partir de los

condicionantes que nos sitúan en ella pero que también nos permiten crear en ella nuevos posibles.

Por esta razón hemos subrayado desde la introducción de este ensayo que la física del devenir, cuyo nacimiento hemos descrito, no es una nueva «visión del mundo», podada de sus raíces, que impone una verdad revelada. Ella no es la verdad del tiempo finalmente llegada sino invención de lenguajes nuevos, apertura de nuevas posibilidades de pensar y de decir lo que vivimos. Bergson, haciendo eco a San Agustín, había escrito: «Nosotros no pensamos el tiempo real. Pero lo vivimos porque la vida desborda la inteligencia. El sentimiento que tenemos de nuestra evolución y de la evolución de todas las cosas en la duración pura está allí, dibujando en torno a la representación intelectual propiamente dicha una franja indecisa que va a perderse en la noche»[7]. La construcción de un coherencia entre lo que vivimos y lo que somos capaces de pensar es una tarea abierta, indefinida, que constituye el «lugar común» en el que nuestros saberes y nuestras experiencias pueden entrar en relaciones que no los oponen en sus certezas antagónicas sino que los abren a lo que les desborda.

Quizá esta tradición occidental cuya especificidad hemos subrayado sigue siendo más preciosa que nunca. En Europa se inventó la aventura inquieta de un saber susceptible de poner en cuestión cualquier norma, cualquier evidencia, cualquier valor tradicional. En Europa también se inventó la idea de democracia, de sociedad abierta a un futuro que no modela ningún orden trascendente. Hoy día, todos los sabemos, es esencial que ciencia y democracia inventen una nueva forma de diálogo. Para que sea posible un diálogo entre dos prácticas con condicionantes tan diferentes es necesario que se cree un mundo denso y múltiple de intereses compartidos. Pues éste es el interés que a la vez da sentido a los condicionantes, permite reconocerlos como algo distinto de normas arbitrarias y comprender, léase compartir, la pasión por los problemas que determinan estas ligaduras. Europa, donde se liberaron estos intereses que durante tanto tiempo se consideraron opuestos por naturaleza, los del «saber» y los de la «vida», como decía Gastón Bachelard, debería ser especialmente sensible a este desafio del futuro. Quizá su riqueza

H. Bergson, *L'Evolution créatrice*, *op. cit.*, p. 534.

cultural, su diversidad, su tradición histórica, alimentarán la invención de las prácticas nuevas que requiere la construcción del mundo del mañana.

APÉNDICES

Introducción

En los tres apéndices que siguen nos gustaría añadir algunas notas que precisan las tesis defendidas en este trabajo. La lectura de estos apéndices exige conocimientos más especializados a pesar de que nos hayamos limitado a consideraciones cualitativas y remitamos a las publicaciones originales para su demostración.

Hemos elegido tres temas fundamentales en la perspectiva de este trabajo. El primero tiene relación con el modo en que los procesos dinámicos inestables modifican la estructura del espacio-tiempo. Esta cuestión era el núcleo del debate entre Einstein y Bergson [1]. El resultado de este debate fue desastroso para Bergson: se admite generalmente que este último se había equivocado en cuanto a la interpretación de la relatividad restringida de Einstein. Y sin embargo, como vamos a demostrar, la existencia de procesos dinámicos inestable rehabilita hasta cierto punto la idea de un *tiempo universal* defendida por Bergson.

El segundo apéndice hace explícito, a partir del ejemplo de la radiación, lo que entendemos por irreversibilidad intrínseca (ver capítulo 6) y muestra por qué los procesos irreversibles penetran hasta el nivel de descripción fundamental.

Finalmente, el apéndice III hace explícito el resultado indicado en el capítulo 7, según el cual el Big Bang es estructuralmente inestable. Discutimos en particular la cuestión de los aspectos que el Universo

[1] H. Bergson, *Durée et Simultanéité*, en Mélanges, París, PUF, 1972.

actual retiene de los primeros instantes de la inestabilidad que estaría en su origen.

APÉNDICE I

La realidad del tiempo

En el capítulo 7 hemos recordado la métrica del espacio-tiempo de Minkowski, que corresponde a la relatividad restringida de Einstein. Un observador utiliza, para medir longitudes y tiempos, coordenadas x, y, z y t; otro observador, en movimiento rectilíneo con respecto al primero, utiliza coordenadas x', y', z', t'. La condición que impone la teoría de la relatividad es que el intervalo espacio-temporal sea invariante. La existencia de múltiples, tiempos t, t'... conduce a efectos notables (corno la famosa paradoja de los gemelos). ¿Debemos entonces concluir con Minkowski que el espacio y el tiempo considerados por separado se convierten a partir de ahora en sombras?

Esta es la cuestión que quisiéramos discutir estudiando un sencillo ejemplo de proceso dinámico inestable que se desarrolla en el espacio de Minkowski. Para introducir este ejemplo volvamos primero a la transformación del panadero discutida en el capítulo 5. Como hemos señalado, la inestabilidad proviene del hecho de que un punto contiene una información *infinita* mientras que nuestras medidas o nuestros cálculos suponen una precisión finita. Ya hemos hecho notar que la inestabilidad nos obliga a construir un lenguaje nuevo para describir tales sistemas. Esto es lo que vamos a hacer con la introducción, siguiendo a Misra [2], del concepto del «tiempo interno».

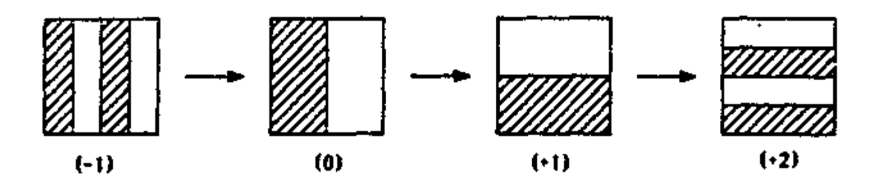


Figura A-I.1.—*Particiones sucesivas generadas por la transformación del panadero. La partición (0) se denomina «partición generatriz».*

B. Misra, *Proc. Nat. Ac. Sci. USA,* vol. 75, 1978, p. 1629.

Consideremos un sistema dinámico y describamos su evolución en su espacio de fases. Llamemos $\rho_t(\omega)$ a la probabilidad de encontrar en el instante t un sistema dinámico en el punto ω. La evolución de este sistema se describe por

$$\rho_t(\omega) = U_t \rho_0(\omega) \quad (I.1)$$

donde U_t es un operador unitario. Consideremos una secuencia de transformaciones del panadero (ver *fig. A-I.1*). A partir de la «partición generatriz» (O) podemos construir todas las demás aplicando la transformación un número arbitrario de veces. Llamemos χ_n a la partición obtenida tras n aplicaciones. La ley dinámica (I.1) se escribe en este caso (la transformación es discreta, $U = T_{t=1}$),

$$\chi_{n+1} = U\chi_n \quad (I.2)$$

Pero también podemos introducir un segundo operador, T, que da la «edad de la partición»[3,4].

$$T\chi_n = n\chi_n \quad (I.3)$$

Las χ_n pueden ser definidas como las «funciones propias» de T, y el conjunto de los valores n como sus «valores propios». La situación es entonces muy similar a la de la mecánica cuántica (ver cap. 6). Los operadores U y T no conmutan. Más exactamente (suponiendo un tiempo continuo) tenemos:

$$U_t^+ \, TU_t = T + t \quad (I.4)$$

Si consideramos una distribución arbitraria (ver *fig. A-I.2*), ya no será una función de T pero podemos calcular el valor medio $<T>$ que (con la normalización adecuada) se escribe:

$$<T>_{\rho t} = <\rho_t, T\rho_t> \quad (I.5)$$

donde $<,>$ corresponde a un producto escalar $(=\int dw r_t (Tr_t))$.

Ahora es fácil ver que:

$$<T>_{\rho t} = <T>_{\rho 0} + t \quad (1.6)$$

El tiempo interno medio $<T>$ crece con el tiempo cronológico medido

[3] Para más detalles véase I. Prigogine, *Physique, temps el devenir*. París. Masson, 1980.

[4] I. Prigogine e I. Stengers, *La nueva alianza, op. cit.*, capitulo IX.

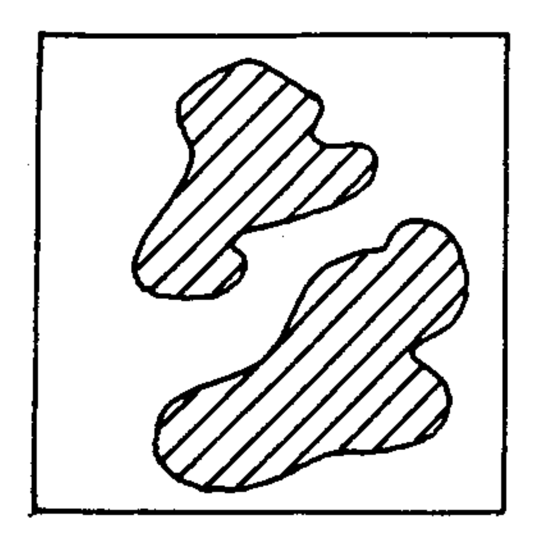


Figura A-I.2.—*Distribución arbitraria distinta de una de las particiones X_n de la figura precedente.*

por t. Sin embargo ambas nociones son muy diferentes. El tiempo interno está relacionado con la distribución en el interior del cuadrado: mide su fraccionamiento. Es un tiempo «topológico».

Muy recientemente Misra [5] ha demostrado que el concepto de tiempo interno es aplicable también a una categoría muy distinta de objetos tales como los *campos.* Consideremos a título de ejemplo la propagación de la luz. En este caso tenemos la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \Delta \psi \qquad \text{(I.7)}$$

correspondiente a la propagación de una onda luminosa de amplitud Y con una velocidad c. La función Y describe un campo (escalar) en todo punto del espacio-tiempo. Curiosamente, la solución de esta ecuación nos pone ante un problema parecido en ciertos aspectos al del panadero. En efecto, consideremos un observador en reposo en el punto O (ver *fig. A-I.3).* Una señal luminosa emitida en el punto x, le llega en t_1, la emitida en el punto x_2, en t_2. Es evidente que el futuro lejano del

B. Misra, *J. Stat. Phys.*, vol. 48, 1988, p. 1295.

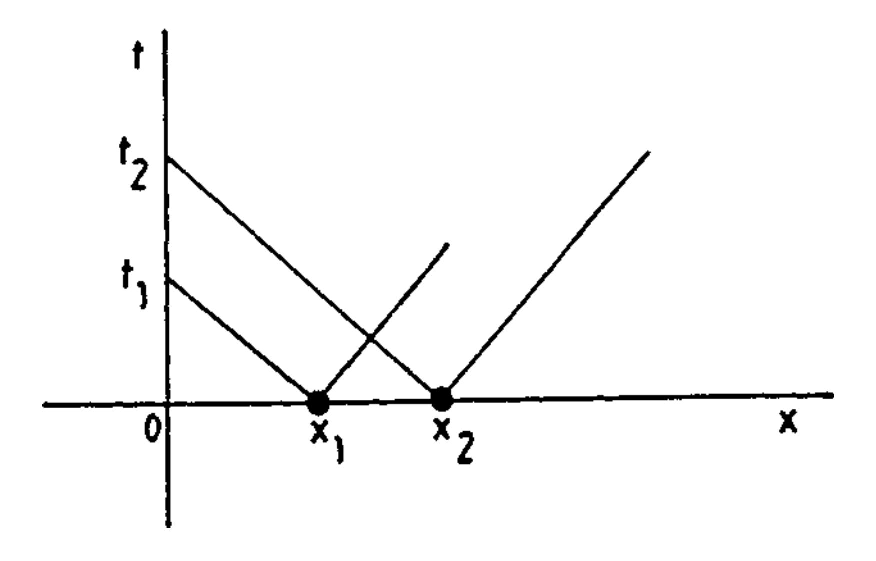


Figura A-I.3.—*Las señales recibidas en t_1, t_2... provienen de puntos x_1, x_2... cada vez más alejados del origen.*

observador estará determinado por lo que pase para t = O a distancias crecientes del punto en el que está situado (simplemente estamos parafraseando el llamado problema de Cauchy para la solución de la ecuación en derivadas parciales I.7).

Seria necesario entonces conocer las condiciones iniciales en todo el eje de las x hasta el infinito para predecir lo que va a pasar para t tendiendo a infinito, del mismo modo que era necesario conocer el número infinito de decimales que describen un punto en el caso de la transformación del panadero. También en este caso sólo disponemos de una ventana finita por grande que sea. Resultado de ello, como Misra ha demostrado, es una inestabilidad semejante a la del panadero (volvemos a encontrar un K-flujo, ver cap. 5).

Una de las consecuencias de esta inestabilidad es que también podemos definir ahora un tiempo interno T. Su valor medio sobre el campo vendrá dado, igual que en I.5, I.6, por:

$$<T>_{\psi_t} = <\psi_t, T\psi_t> = <T>_{\psi_0} + t \qquad (I.8)$$

Demostraremos ahora que la existencia de este tiempo interno

asociado al campo cambia radicalmente las propiedades del espacio-tiempo[6,7].

Situémonos en el marco de la relatividad restringida. Como hemos recordado en el capítulo 3, el intervalo espacio-temporal s_{12} dado por:

$$s_{12}^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 \tag{I.9}$$

juega aquí un papel fundamental. Un diagrama (ver *fig A-I.4),* reproducido en todos los libros que tratan estos problemas, indica la *clasificación* de los sucesos espacio-temporales que se deriva del intervalo (I.9).

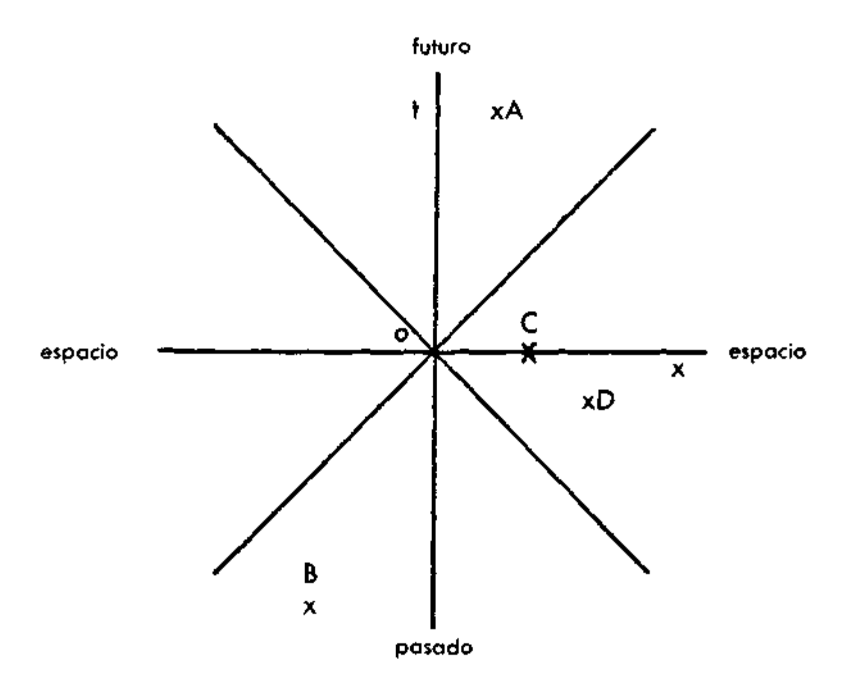


Figura A-I.4.—*Clasificación de los sucesos espacio-temporales. EL «cono causal» que define las regiones causales (en las que los sucesos están ordenados temporalmenteJ está limitado por las rectas ct = x y — ct = x.*

[6] I. Antoniou, *Internal Time and Irreversibility of Relativistic Dynamical Systems*, tesis presentada en la Université Libre de Bruselas. 1988.
[7] B. Misra, I. Antoniou e I. Prigogine

El cono de luz $\pm ct = x$ determina las regiones «causales». Para cualquier observador inercial el suceso A pertenece al futuro de O, el suceso B al pasado de O (el intervalo s_{AO}, o el s_{OB}, es «temporal»). Por el contrario, C sólo es simultáneo con O para una elección particular del sistema de referencia (el intervalo s_{CO} es «espacial»). Si cambiamos de sistema de referencia, C puede hacerse anterior a O, o posterior). Sucede lo mismo con D, que en la elección particular aquí representada es anterior a O.

La noción de simultaneidad se hace relativa al observador. Este es un ejemplo de los tiempos «múltiples» de la relatividad restringida.

Veamos cómo cambian las cosas si tenemos en cuenta que cada observador puede medir el campo escalar ψ y, a partir de él, deducir el tiempo medio $<T>$ correspondiente a ese campo.

El campo es en sí mismo invariante-Lorentz (es decir, invariante respecto a las transformaciones que dejan I.9 invariante). Pero el tiempo medio interno $<T>$ se modifica no solamente cuando se cambia el tiempo, como indica I.8, sino también cuando se cambia de posición, un poco como cambia un paisaje cuando se mira desde un punto de observación diferente. Recíprocamente, esto significa que observando el campo y su tiempo interno medio, un observador puede obtener información sobre su posición, al contrario de lo que supone la relatividad restringida. Sin embargo, en cualquier punto el tiempo interno aumenta con el tiempo t de modo que quede en el intervalo (I.9).

Un ejemplo de la distribución de los tiempos medios en el espacio-tiempo se da en la *figura A-I.5.* Esta figura representa, para un campo dado, las «lineas» de edad, es decir, el lugar de los puntos que tienen el mismo tiempo interno medio. Como se puede ver, las líneas de edad son paralelas al cono de luz definido por $ct = x$. Un observador que se desplazara con la misma velocidad de propagación del campo que observa, en este caso con la velocidad de la luz, atribuirá siempre el mismo tiempo interno medio al campo que observa. Por otra parte, la edad promedio disminuye hacia la derecha, mientras que el cono causal de la *figuraA-I.4* era perfectamente simétrico respecto al eje x. De este modo se rompe la simetría del espacio-tiempo relativista. La *figura A—I.4* ilustraba la clasificación de los sucesos espacio-temporales tal como la define la relatividad. Consideremos los sucesos C y D en las *figuras A-I.4 y 5.*

Ambos estaban fuera del cono causal de la primera figura, lo que significa que no era posible conferirles un orden temporal único para todo sistema de referencia. Por el contrario, la *figura A-I.5* permite ordenarlos de forma unívoca pues:

$$<T>_C > <T>_D \qquad (I.10)$$

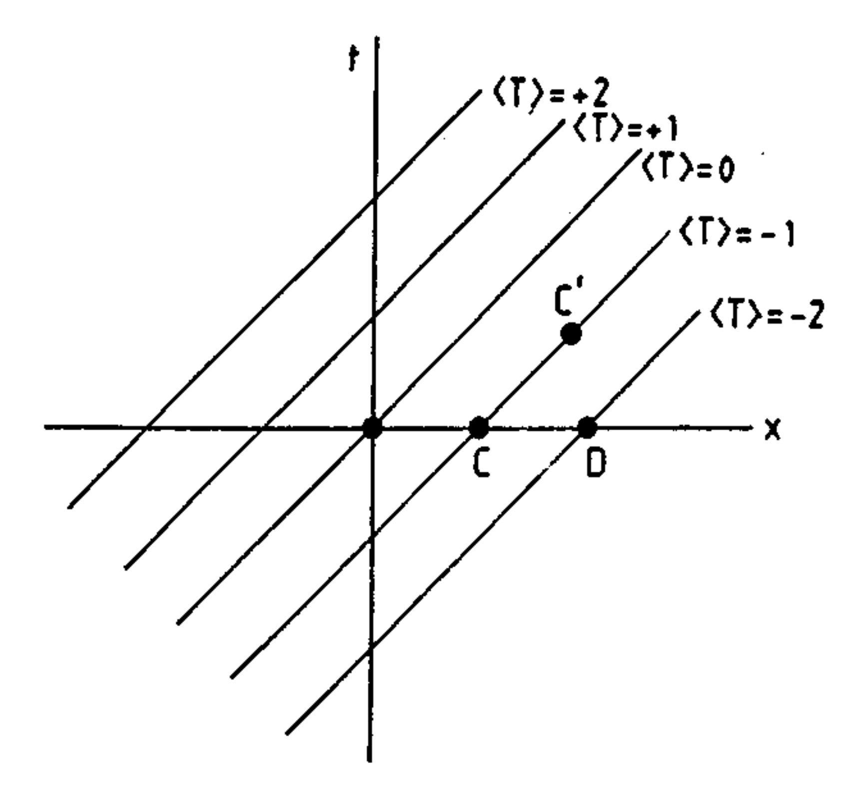


Figura A-I.5.—*Ejemplo de distribución de los tiempos internos medios. La edad promedio disminuye hacia la derecha. Las líneas de igual edad son paralelas a ct = x. Las unidades son arbitrarias.*

La edad promedio atribuida al campo por el observador C es mayor que la que el observador D atribuye a este campo. ¡El observador C ve un mundo que ha envejecido más! Esta sucesión es invariante-Lorentz. Asimismo, la condición de simultaneidad:

$$\langle T \rangle_C = \langle T \rangle_C \qquad \text{(I.11)}$$

es invariante-Lorentz. Todos los observadores situados sobre la misma línea de edad, cualquiera que sea su sistema de referencia, atribuyen la misma edad promedio $\langle T \rangle$ al campo.

Contrariamente a lo que parece desprenderse de la relatividad restringida, existe así un tiempo universal que parte de la observación de

un fenómeno físico relativista, en este caso la propagación de la onda. En la descripción minkowskiana los observadores se observan mutuamente. Aquí observan, además, la evolución del campo, sistema dinámico inestable que permite la introducción de un tiempo interno.

Para visualizar mejor lo que sucede quizá sea divertido superponer la *figura A-I.5* con la representación de una isla en cuyo perímetro se han construido modernos hoteles pero cuyo interior contiene casas ancestrales (*fig. A-I.6*). Es natural que la apreciación de la secuencia temporal sea la misma para todos los observadores.

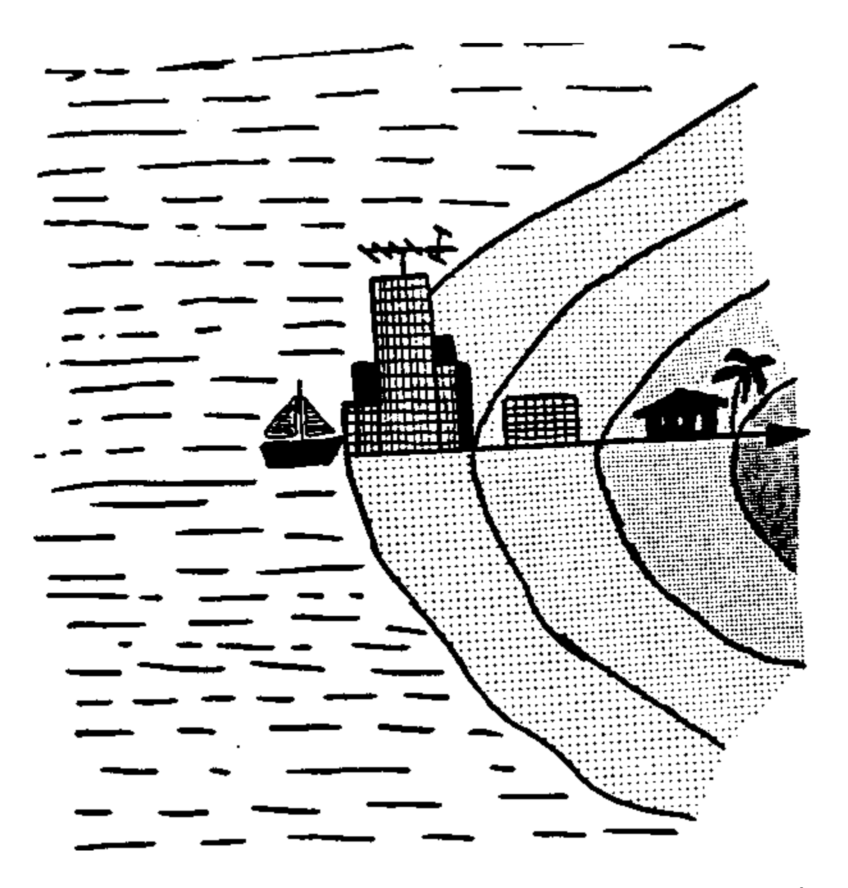


Figura A-I.6.—*La observación de la «onda de modernización» permite romper la homogeneidad del espacio-tiempo de la isla.*

De este modo, la introducción de procesos dinámicos inestables permite reconciliar la idea fundamenta! de Einstein, de tiempos múltiples ligados a diferentes observadores, con la existencia de un devenir universal que defendía Bergson.

APÉNDICE II

Irreversibilidad intrínseca

En el capítulo 4 hemos introducido la noción de irreversibilidad intrínseca para distinguir los fenómenos cuya aparente irreversibilidad podría estar introducida por nuestra observación (y corresponden entonces a la reducción del paquete de ondas), y los fenómenos cuya irreversibilidad es intrínseca y requieren una descripción diferente.

Hemos discutido, a título de ejemplo, el problema de la emisión de radiación cuando un electrón salta de una órbita a otra. Evidentemente este problema tiene una analogía clásica [1]. Cualquier partícula cargada acelerada radia y esta radiación produce a su vez un amortiguamiento de radiación. Vamos a profundizar en este problema pues ilustra muy bien la noción de irreversibilidad intrínseca en el nivel microscópico.

Examinemos primero cómo se plantea el problema de la interacción entre una partícula material y una carga electromagnética [1,2].

Una partícula está caracterizada por el hamiltoniano H. Si se trata de una partícula libre, el hamiltoniano es simplemente $H_p = p^2/2m$. Si se trata de un oscilador tenemos

$$H_p = p^2/2m + m\omega_0^2/2\ q^2 \tag{II.1}$$

donde ω_0 es la frecuencia del oscilador. Por otro lado un campo libre puede describirse mediante un conjunto de osciladores [3] y por un hamiltoniano H_c que es la suma de los hamiltonianos correspondientes:

$$H_c = \sum_i 1/2(p_i^2 + \omega_i^2 q_i^2) \tag{II.2}$$

Si la partícula está cargada se establece un acoplamiento entre la partícula y las oscilaciones del campo [2]. Se crea una «nube de polarización» alrededor de la partícula. Si la partícula está en reposo (o en movimiento uniforme) esta nube da lugar a una energía suplementaria que puede ser absorbida en la masa de la partícula. Este es un ejemplo

[1] Véase cualquier libro sobre electrodinámica, por ejemplo L. Landau y E. Lifchitz, *Théorie des champs*, edición MIR, Moscou, 3.ª ed., 1970, o J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. New York. J. Wiley & Sons, 2.ª ed., 1975.

[2] W. Heitler. *The Quantum Theory of Radiation*. New York, Dover Publication. 1984

del procedimiento de renormalización que hemos mencionado en el capítulo 6 (el hecho de que aparezca un infinito en el caso de una partícula puntual no importa ahora). En el caso de un oscilador la situación se hace más complicada ya que tendremos *resonancia* entre la partícula y los modos del campo para $\omega_1 = \omega_0$. El teorema de Poincaré (ver cap. 5) es aplicable y podemos incluso esperarnos un comportamiento cinético en el caso en que el recipiente en el que colocamos la partícula se haga grande (entonces, la suma de II.2 se convierte en una integral).

Tenemos aquí un ejemplo del cambio radical que conoce hoy la distinción entre lo que es simple y lo que es complejo (ver cap. 4). Las propiedades de una partícula dependen, a través del campo, de un infinito número de variables y la complejidad de su movimiento se hace comparable a la de un gas o un líquido formado por un número inmenso de partículas.

El efecto de la resonancia puede ser ilustrado mediante cálculos con ordenador[3]. Podemos seguir la energía del oscilador material en el curso del tiempo. La teoría clásica[1,2] introduce un tiempo característico de amortiguamiento $1/\gamma$, con

$$\gamma = 2e^2/3mc^3\ \omega_0^2 \qquad \text{(II.3)}$$

γ sólo depende, además de la masa del oscilador y su frecuencia, de las constantes universales e y c. Al igual que en la teoría cuántica, este tiempo $1/\gamma$ es muy grande comparado con el inverso de la frecuencia ω_0 del oscilador. Si, como en el capítulo 6, introducimos la razón entre el tiempo «reversible» $(1/\omega_0)$ y el tiempo «irreversible» $(1/\gamma)$ encontramos para un electrón $(\omega_0 = 10^{14}\ \mathrm{sec}^{-1})$.

$$\rho = \gamma/\omega_0 \approx 10^5/10^{14} \approx 10^{-9} \qquad \text{(II.4)}$$

Pero los cálculos con ordenador (hechos sobre un modelo de una sola dimensión espacial) nos permiten amplificar los efectos del amortiguamiento de radiación eligiendo en particular otros valores para las constantes e y c.

La teoría clásica nos lleva a predecir que observaremos un decrecimiento exponencial de la energía del oscilador.

$$E_t = E_0 e^{-\gamma t} \qquad \text{(II.5)}$$

Curiosamente, los cálculos muestran un comportamiento diferente que depende de las condiciones iniciales. Si partimos de la partícula

[3] T. Y. Petrosky, comunicación personal.

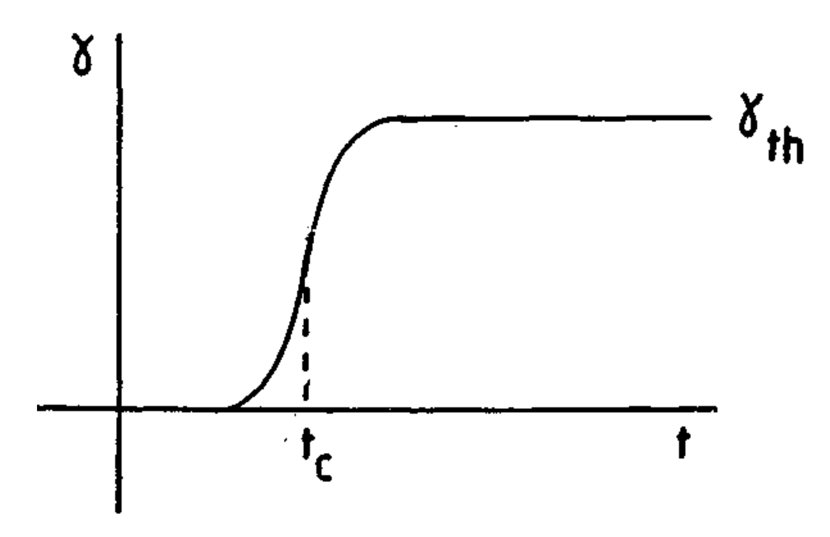


Figura A-II.1.—*Simulación del amortiguamiento por radiación de un oscilador cargado*[3]. *Las condiciones iniciales corresponden a una partícula «desnuda». Las unidades son arbitrarias.*

«desnuda» (es decir, si ningún oscilador del campo está excitado, $p_i = q_i = 0$ para t = 0), encontramos el resultado representado esquemáticamente en la *figura A-II. 1.*

Sólo al cabo de un tiempo t_c del orden de seis períodos se hace patente el amortiguamiento y el oscilador se pone a radiar. Luego alcanza rápidamente su valor teórico (II.3). Pero este comportamiento no es universal. Depende de las condiciones iniciales. En cualquier caso, cualesquiera que sean las condiciones iniciales, alcanzamos al cabo de un cierto tiempo el mismo valor γ_{th} (ver *flg. A-II.2).* La situación (a) representada en esta figura corresponde al resultado ya dado en la *figura A-II.1.* En el caso (b) partimos *directamente* del valor correcto para el amortiguamiento. En el caso (c) el oscilador radia al principio *más* de lo que predice la teoría clásica. En el caso (d) comienza por *absorber* energía antes de ponerse a radiar.

La analogía con la*figura 16*, que se refiere al comportamiento de un gas, es sorprendente. La función H tiende también hacia su valor de equilibrio cualesquiera que sean las condiciones iniciales. La situación (d) en la *figura II.2* es análoga a la experiencia de inversión de velocidades de la *figura 17.* Durante un cierto tiempo el sistema se aleja del equilibrio puesto que la oscilación se autoexcita (como si el oscilador volviera hacia su pasado).

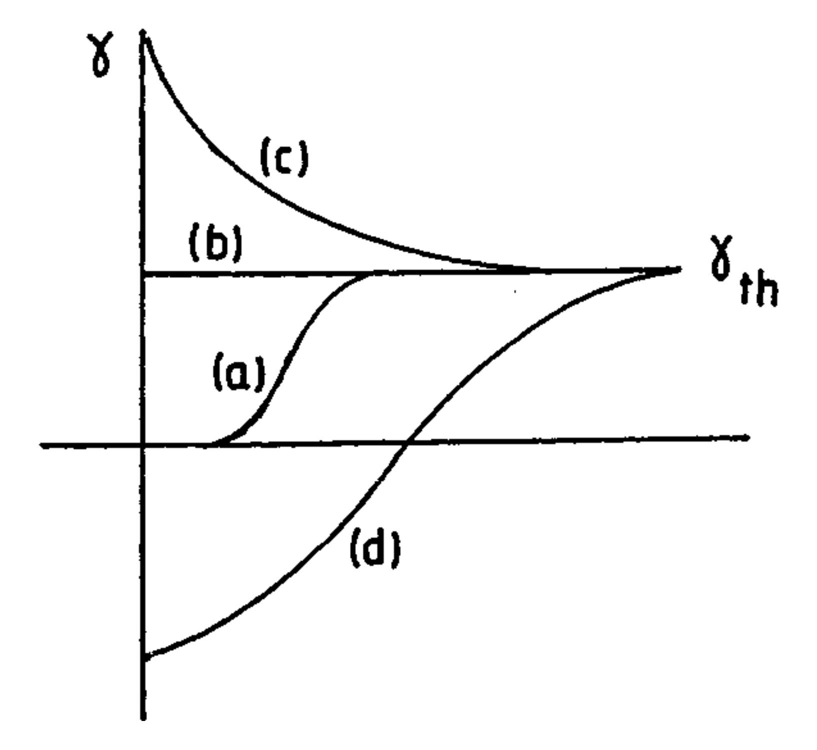


Figura A-II.2.—*Simulación del amortiguamiento por radiación para diferentes condiciones iniciales* [3]. *Las unidades son arbitrarias.*

Pero el punto esencial es que, independientemente de nuestra preparación inicial, alcanzamos el mismo régimen al cabo de cierto tiempo. El sistema escapa así a nuestro control del mismo modo que, de acuerdo con el segundo principio, no podemos impedir que la magnitud H alcance su valor de equilibrio. Qué mejor ejemplo de *irreversibilidad* intrínseca, y ello en el dominio microscópico pues sólo hemos invocado las leyes fundamentales que ligan materia y radiación.

¿Qué sucede en el intervalo de tiempo anterior a que y alcance su valor estacionario γ_{th}? Durante este tiempo se constituye el «revestimiento de no-equilibrio». La diferencia esencial entre este revestimiento y el revestimiento de equilibrio de una partícula estable, definida por el procedimiento de renormalización habitual, es la *localización* de la energía de los modos normales en la zona de frecuencias próximas a la resonancia (a una localización en el espacio de longitudes de onda corresponde una *deslocalización* en el espacio).

Podemos entender con este ejemplo la diferencia entre una transformación unitaria que conduce a variables acción-ángulo y la transformación no unitaria que hemos mencionado en varias ocasiones en los capítulos 5 y 6. En el primer caso pasamos de la partícula estable «desnuda» a la partícula «vestida» por los modos del campo, en el segundo de la partícula «desnuda» a la partícula con su revestimiento de *no-equilibrio* que permite que escape la radiación. Una prueba es que si efectuamos primero la transformación no unitaria, es decir, si partimos no de partículas desnudas sino de partículas con su vestimenta de no-equilibrio, obtenemos la curva (b) de la *figura II.2* en la que y toma instantáneamente (con la precisión del ordenador) su valor γ_{th}.

Este comportamiento del amortiguamiento de radiación no es compatible con una descripción en términos de trayectorias, en la que existe una relación biunívoca entre el estado inicial y el estado final. La existencia de la resonancia introduce, como en el capítulo 5, un horizonte temporal y nos hace perder el control de las trayectorias. Ella lleva al sistema a un régimen cinético (análogo al del movimiento browniano o al de la ecuación cinética del Boltzmann).

Estas consideraciones son extensivas al caso cuántico, pues también en este esperamos que la resonancia nos haga perder el control de la función de onda y nos conduzca a un tipo de comportamiento cuántico «cinético» tal como lo hemos descrito en el capítulo 6. Debemos señalar, por otra parte, la analogía entre el retardo en radiar que manifiesta el oscilador cuando partimos de la partícula desnuda (*fig.A-II.1*) *y* la paradoja de Zenón descrito en el capítulo 6.

APÉNDICE III

El origen del Universo: ¿singularidad o inestabilidad?

La fascinación que ejerce sobre nosotros la cuestión del origen del Universo nos incita a volver sobre el problema planteado en el capítulo 7 de este libro: ¿Debemos asociar a este origen una *singularidad* (tal como el Big Bang) o una *inestabilidad*? Hemos descrito una reciente aproximación que incluye la creación de materia como proceso irreversible. Esta producción de materia da lugar a una inestabilidad que, por amplificación, conduce al Universo actual. Quisiéramos retornar aquí estas cuestiones insistiendo en su aspecto termodinámico, y precisar lo que significa exactamente la inestabilidad estructural del Big Bang ya apuntada en el capítulo 7[1].

[1] Seguimos la exposición de I. Prigogine. J. Géheniau, E. Gunzig y P. Nardone.

En primer lugar, recordaremos brevemente las ideas básicas de la cosmología tradicional (el modelo standard)[2]. Esta cosmología está basada en la ecuación fundamental de la relatividad general que liga el tensor métrico con el tensor de energía-impulso. En el caso más simple, el de un Universo isótropo, homogéneo y sin curvatura espacial, se obtiene para la métrica[2]:

$$ds^2 = dt^2 2 - R^2(t)\ (dx^2 + dy^2 + dz^2) \qquad \text{(III.1)}$$

La única diferencia con la métrica de Minkowski es la aparición de un «radio» del Universo R(t). De particular importancia aquí es la función de Hubble:

$$H = R/\dot{R} \qquad \text{(III.3)}$$

donde el punto sobre la R significa la derivada temporal.

En este caso, la ecuación de Einstein da la relación entre la densidad de energía ρ y el radio del Universo R:

$$\kappa\rho = 3H^2 \qquad \text{(III.3)}$$

con:

$$\kappa = 8\pi G/c^4 \qquad \text{(III.4)}$$

donde G es la constante de gravitación universal y c la velocidad de la luz.

Ya hemos visto que la ecuación de Einstein predice una evolución adiabática del Universo. Tenemos entonces:

$$dE + pdV = 0 \qquad \text{(III.5)}$$

o, tomando un elemento de volumen proporcional a R^3,

$$d\rho R^3 + pdR^3 = 0 \qquad \text{(III.6)}$$

En el caso simple en que la materia es «incoherente», es decir, en que el contenido material del Universo viene caracterizado por una presión p nula, (III.6) se reduce a:

$$\rho R^3 = \text{constante} \qquad \text{(III.7)}$$

[2] Véase cualquier libro sobre cosmología, en particular S. Weinberg, *Los tres primeros minutos del Universo, op. cit.*

Introduciendo esta relación en (III.3) obtenemos una ecuación para el radio (R(t). Su solución muestra que la expansión parte de un punto singular $R = 0$ (el Big Bang).

En la cosmología tradicional no hay creación de materia. Por esta razón (ver III.7) tenemos también, llamando n a la densidad de partículas,

$$nR^3 = \text{constante} \qquad \text{(III.8)}$$

Ya hemos mencionado varias veces el «Universo de de Sitter». Este es un Universo especial en el que todos los valores dé las variables termodinámicas intensivas, tales como r, p, n son constantes en el tiempo. La ecuación (III.6) muestra que ello sólo es posible si:

$$\rho + p = 0 \qquad \text{(III.9)}$$

lo que, para p > O, implica p < O, situación curiosa ya que normalmente la presión es positiva. Si admitimos (III.9), (III.2) nos da:

$$H = \pm\sqrt{\kappa\rho/3} \quad \text{o} \quad R = R_0 e^{\pm\sqrt{\kappa\rho/3}\,t} \qquad \text{(III.10)}$$

El Universo de de Sitter es entonces un Universo en expansión (o en contracción) exponencial. La dificultad es que para justificar (III.9) debemos introducir una constante cosmológica en la ecuación de Einstein aunque la observación del Universo actual no muestra ninguna huella de tal constante.

Queremos modificar ahora la ecuación termodinámica (III.5 ó III.6) teniendo en cuenta la creación de materia. Esto equivale a añadir un término *fuente de energía interna.* Argumentos elementales[3,4 5] muestran que la nueva ecuación es:

$$d\rho R^3 + p dR^3 - h/n \, dnR^3 = 0 \qquad \text{(III.11)}$$

donde h es la entalpía,

$$h = \rho + p \qquad \text{(III.12)}$$

Notemos que no hacemos ninguna hipótesis sobre el origen microscópico de este término. Como se indica en el capítulo 7, podría estar ligado

[3] I. Prigogine, *Elude thermodynamique des phénomenes irreversibles,* tesis, Lieja, Desoer, 1947.

* P. Glansdorff e I. Prigogine, *Structure, stabilité et fluctuation,* París, Masson, 1971.

[5] S. de Groot y P. Mazur, *Non Equilibrium Thermodynamics,* Amsterdam, North Holland Pub. COMP., 1962.

a la transformación de energía gravitatoria negativa en energía positiva de la materia.

Podemos escribir también (III. 1.1) en la forma

$$d(\rho R^3) + (p + p_{cr})\, dR^3 = 0 \qquad \text{(III.13)}$$

con

$$p_{cr} = -h/n\, dnR^3/dR^3 = -h/3nH\, (\dot{n} + 3nH) \qquad \text{(III. 14)}$$

La introducción de la creación de materia conduce así a una *presión adicional* P_{cr}. Es interesante observar que en el caso del Universo de de Sitter n = O y se tiene simplemente:

$$p_{cr} = -h \qquad \text{(III. 15)}$$

Para calcular la producción de entropía partimos como siempre en termodinámica macroscópica de la diferencial total de la entropía (para un solo componente).

$$TdS = dE + pdV - \mu dN \qquad \text{(III. 16)}$$

donde u es el potencial químico por partícula

$$\mu n = h - Ts \qquad \text{(III. 17)}$$

Teniendo en cuenta el término suplementario debido a la creación de partículas (ver **III. 11**) que hace del Universo un sistema **termodinámico** abierto, obtenemos como expresión del segundo principio:

$$d_iS = s/n\ d\ (nR^3) \geq 0 \qquad \text{(III.18)}$$

Notemos que la variación de entropía dS se reduce aquí a la producción de entropía d,S pues en un Universo homogéneo e isótropo no hay flujo de entropía.

La desigualdad (III. 18) expresa que la creación de panículas es un proceso irreversible. El espacio-tiempo puede crear materia, pero no a la inversa. Esta desigualdad puede escribirse en forma más explícita:

$$\dot{n} + 3Hn \geq 0 \qquad \text{(III.19)}$$

y permite establecer una relación entre creación de materia (n) y función de Hubble. En particular para el Universo de de Sitter, $\dot{n} = 0$ y obtenemos:

$$H \geq 0 \qquad \text{(III.20)}$$

Comparando con (III. 10) vemos que sólo un Universo de de Sitter en *expansión* es termodinámicamente posible.

La extensión de la ecuación de Einstein al caso de la creación de materia es ahora fácil: basta reemplazar en el tensor energía-impulso la presión p por la suma $p + p_{cr}$. Esto tiene varias consecuencias. En el caso del Universo de de Sitter la dificultad asociada a la ecuación de estado (III.9) desaparece pues ahora tenemos (ver III. 15)

$$\rho + p + p_{cr} = 0 \text{ ó } \rho + p = h \qquad \text{(III.21)}$$

El Universo de de Sitter se hace compatible con una ecuación de estado «normal» con presión positiva.

Veamos ahora la forma de introducir la *inestabilidad estructural* del Big Bang. Para ello debemos precisar la cinética de la creación de materia. La ecuación cinética más sencilla compatible con la desigualdad (III. 18) es:

$$1/R^3 \, dnR^3/dt = \alpha H^2 \qquad \text{(III.22)}$$

Esta ecuación juega aquí el mismo papel que las ecuaciones de Fourier o de Fick en los fenómenos de transporte. Relaciona la creación de materia con el *cuadrado* de la función de Hubble. Para a = O reencontramos el modelo standard.

Como vamos a mostrar, para $\alpha = 0$, por pequeño que sea, la singularidad (el Big Bang) queda reemplazada por una inestabilidad. En este sentido decimos que el Big Bang es estructuralmente inestable como lo es un péndulo perturbado por la más mínima fricción (ver cap. 4).

Supongamos que la densidad de energía se debe a la presencia de partículas de masa fija M, de modo que:

$$\rho = Mn \qquad \text{(III.23)}$$

Para obtener nuestra cosmología «no tradicional» combinamos (III.3), (III.22) y (III.23). Esto conduce inmediatamente a la solución

$$(nR^3)_t = (nR^3)_0 \, e^{\kappa M\alpha t/3} \qquad \text{(III.24)}$$

La creación de materia da lugar a una inestabilidad.

Podemos resolver fácilmente las ecuaciones para n(t) y R(t) y calcular así la función de Hubble. Los resultados se muestran esquemáticamente en la *figura A-III.1*. Es interesante indicar el valor inicial de H, H_0, y su valor estacionario H_{ds}:

$$H_0 = \sqrt{\kappa M n_0/3} \qquad \text{(III.25)}$$

$$H_{ds} = \kappa M\alpha/9 \qquad \text{(III.26)}$$

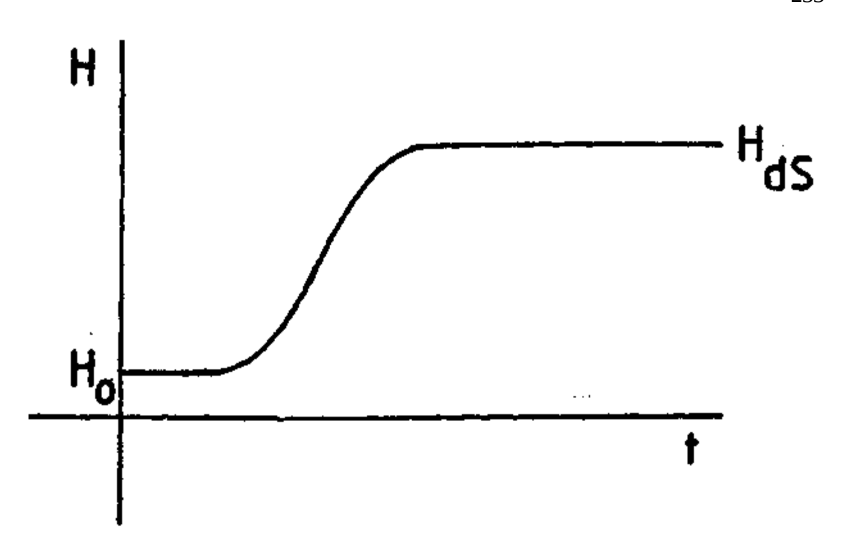


Figura A-III.1.—*Evolución de la función de Hubble, a partir de una inestabilidad que le confiere el valor H_0, hacia su valor estacionario «de Sitteriano» H_{ds}. Las unidades son arbitrarias.*

En el estado estacionario estamos en un Universo de de Sitter con expansión exponencial (ver III. 10). El valor estacionario H_{ds} se alcanza al cabo de un tiempo

$$t_{cr} = 6/\kappa M\alpha \qquad \text{(III.27)}$$

La variación de n(t) viene representada por una curva similar a la de H (*fig.A-III.1,* ver también la *fig. 23* del cap. 7).

El Universo de de Sitter juega así el papel de *«atractor».* Cualquiera que sea el valor de a, la inestabilidad conduce al cabo de un tiempo t_{cr} al Universo de de Sitter. Sólo para a = 0 reencontramos la cosmología tradicional.

El Universo de de Sitter no ha podido durar indefinidamente pues todos los datos indican que el Universo se encuentra actualmente en una fase de expansión adiabática. Es necesario entonces, como ya hemos indicado en el capítulo 7, introducir una transición entre un Universo de de Sitter y un Universo adiabático (ver *fig. A-III.2).*

Si nos damos una representación idealizada del Universo standard, es decir si consideramos que sólo contiene fotones (radiación) y

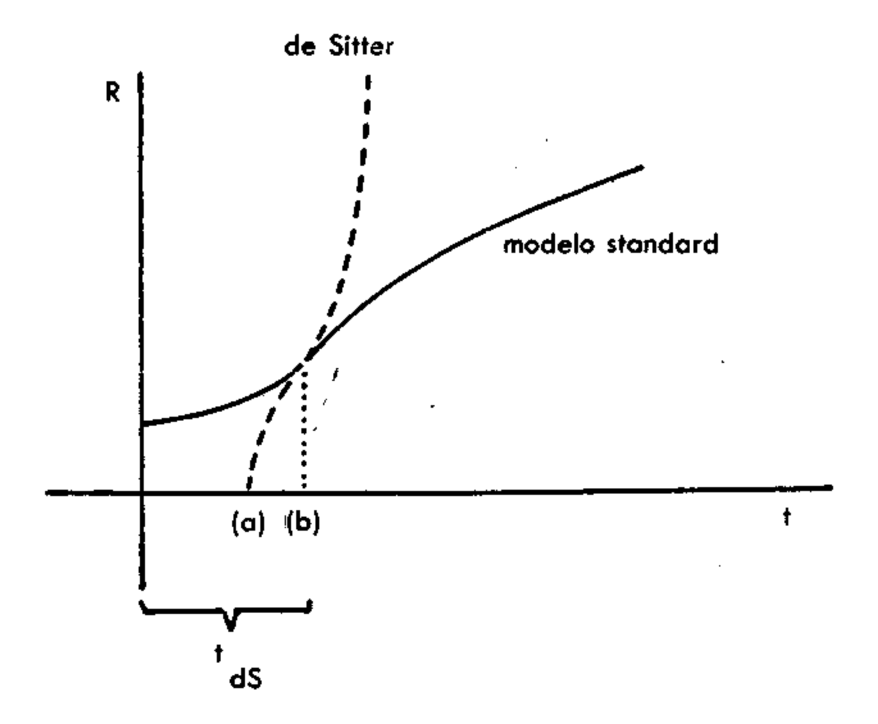


Figura A-III.2.—*Transición entre el Universo de de Sitter y el del modelo standard. Las líneas continuas indican las evoluciones físicas, y las de puntos, sus extrapolaciones. (a) corresponde al Big Bang, no realizado, y (b) a la transición entre los dos Universos después de un tiempo* t_{ds} *que es la duración de la existencia física del Universo de Sitteriano.*

bariones, se hace fácil el cálculo de las condiciones de empalme. Obtenemos así las densidades de energía de radiación y de materia en el momento del nacimiento del Universo adiabático:

$$\rho_\gamma \approx 3/\kappa \ H_{ds}^2 \qquad \text{(III.28)}$$

$$\rho_m = 6/\kappa \ H_{ds}^2 \ e^{-H_{ds} t_{ds}} \qquad \text{(III.29)}$$

A partir de estas condiciones iniciales evoluciona el Universo adiabático (para más detalles ver la nota 1). Por supuesto, esto es una idealización pues en el punto de empalme el Universo contiene un número inmenso de partículas «exóticas» hoy desaparecidas.

Comparando con (III.26) vemos que los detalles de la inestabilidad inicial (es decir, los valores de n_0, R_0 y H_0) han desaparecido. Al igual que en el caso de una inestabilidad química que lleva a un ciclo límite, los detalles de la perturbación inicial no cuentan. *Tres* parámetros de la era de Sitteriana subsisten: la masa M de las partículas creadas, la «velocidad de creación» a y el tiempo de existencia del Univeso de de Sitter T_{ds}.

Vemos ahora por qué la hipótesis de los mini-agujeros negros es tan seductora. Gracias a ella el número de parámetros que determinan la cosmología standard, y por consiguiente la estructura termodinámica del Universo actual, se reduce a uno solo, la masa M de los mini-agujeros negros, pues a partir de ella podemos calcular la función de Hubble del Universo de de Sitter (y por lo tanto a) y su duración t_{ds}. Es notable que con una M del orden de 50 masas de Planck obtenemos un buen acuerdo con los datos termodinámicos actuales. Ahora bien, como hemos visto en el capítulo 7, éste es el valor deducido teóricamente por Brout, Englert, Gunzig *el al.* a partir de su aproximación basada en una teoría cuántica de campos. Este acuerdo es tanto más inesperado cuanto que estamos todavía lejos de una teoría unificada satisfactoria que ligue gravitación y teoría cuántica. Insistimos una vez más en el hecho de que nuestros argumentos, que conducen a una modificación de las ecuaciones de Einstein mediante la introducción de la presión suplementaria P_{cr}, son macroscópicos y, por lo tanto, independientes de cualquier teoría microscópica de la creación de materia.

ÍNDICE ANALÍTICO

En este índice figuran las personas citadas en el texto principal, así como los principales conceptos. En lo que respecta a éstos últimos, se indican en negrita las páginas en las que vienen definidos o tratados en profundidad.